INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



EL SALTO E LAS BALLENAS

Mayo 1985
400 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 104
Mayo 1985

INVESTIGACION Y CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Manuel Puigcerver: *Volcanes y nubes de Venus*; Isabel García Acha y Julio Rodríguez Villanueva: *Translocaciones cromosómicas y cáncer humano*; Pedro Pascual: *Las dimensiones ocultas del espacio-tiempo*; Joandomènec Ros: *Por qué saltan las ballenas*; Julio A. Alonso: *Implantación iónica de superficies*; Jacobo Cárdenas: *Química del ajo y la cebolla*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Manuel Medarde

Libros:

M.ª Rosa Miracle, Mariano Artigas, J. J. Vázquez y Agustín Udías



LA PORTADA

La ilustración presenta una ballena jorobada, o yubarta (*Megaptera novaeangliae*), a punto de saltar o, en el lenguaje de los balleneros del siglo XVIII y de los etólogos actuales, de romper. La rompedura es una maniobra no exenta de finalidad. Su asociación con las actividades sociales sugiere que se trata de una forma de comunicación (véase "Por qué saltan las ballenas", de Hal Whitehead, en este número). El animal de la portada realiza una "rompedura verdadera", que es el tipo más común, en la que el cetáceo emerge del agua de costado, gira en el aire y cae de nuevo sobre el dorso. La otra forma de rompedura es el "desplome de vientre", en el que la ballena emerge del agua con el dorso en posición superior y cae sobre su vientre. Arracimadas en los surcos gulares de la ballena de la ilustración se distinguen varias especies de parásitos; piojos de las ballenas y bellotas de mar (todos ellos crustáceos), que a su vez portan percebes (cirrípedos). En una yubarta puede reunirse media tonelada de parásitos.

Suscripciones:

Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números): 4400 pesetas

Extranjero:
Un año (12 números): 33 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
400 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
500 pesetas

Distribución para España:

Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:

Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - 28030 Madrid
Teléfonos 430 84 81 - 437 12 91

Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.º - 08034 Barcelona
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Peter Ott

Página	Fuente	Página	Fuente
9	AP/Wide World Photos	40	Joan Cotoner y M. Medarde
10	Andrew Christie	41	M. Medarde
11	Earth Satellite Corporation	48-52	Ian Worpole
12	Laboratorio de Propulsión a Chorro, Instituto de Tecnología de California	59	Lewis Trusty, Animals, Animals
14-15	Andrew Christie	60-63	Patricia J. Wynne
19	Larry W. Esposito, Universidad de Colorado; Eric M. Eliason, Servicio Geológico de los EE.UU. (*arriba*); Laboratorio de Propulsión a Chorro, Instituto de Tecnología de California (*abajo*)	65	J. Latova, S.G.A.
21	Donald B. Campbell, Observatorio de Arecibo	66	Joan Cotoner, F.-J. Sánchez-Palencia y L. C. Pérez
22	Peter G. Ford y Gordon H. Pettengill, Instituto de Tecnología de Massachusetts	67-69	Joan Cotoner y L. C. Pérez
23-24	Ilil Arbel	70	Joan Cotoner, L. C. Pérez y J. Latova, S.G.A.
25	Ilil Arbel (*arriba*); Instituto de Geoquímica y Química Analítica V. I. Vernadsky (*abajo*)	71-72	Joan Cotoner y F.-J. Sánchez-Palencia
29	Janet Finan y William Fore	73	J. Latova y M. A. Otero, S.G.A.
30-31	Ilil Arbel	74	J. Latova, S.G.A. (*arriba*), Joan Cotoner y F.-J. Sánchez-Palencia (*abajo*)
32	Janet Finan y William Fore	75	J. Latova y M. A. Otero, S.G.A.
34-36	Ilil Arbel	77	J. Narayan, Laboratorio Nacional de Oak Ridge
		78-82	Gabor Kiss
		83	Gabor Kiss (*izquierda*), Lab. Sandia (*derecha*)
		84	Gabor Kiss
		87-92	Jerome Kuhl
		95-97	Edward Bell
		101	C. W. Schwartz, Animals, Animals
		102-104	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - 08005 Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

DAVID HAFEMEISTER, JOSEPH J. ROMM y KOSTA TSIPIS ("Cumplimiento de los acuerdos sobre control de armamento") son, respectivamente, profesor de física de la Universidad Politécnica de California, doctorando en física por el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y director adjunto del Programa de Ciencia y Técnica para la Seguridad Internacional, del MIT. Hafemeister se licenció en ingeniería mecánica por la Universidad del Noroeste, doctorándose en física por la de Illinois en Urbana-Champaign. De 1964 a 1966 trabajó en el laboratorio científico de Los Alamos, trasladándose ese último año a la Universidad Carnegie-Mellon. En 1969 le contrató la Politécnica de California. Asesoró al Senado de los Estados Unidos desde 1975 hasta 1977 y, al Departamento de Estado, desde 1977 hasta 1979. Se encontraba en el MIT cuando se realizó gran parte del trabajo expuesto en este artículo, en 1983 y 1984. Romm, que se licenció en física por el MIT en 1982, colabora con Tsipis en el Programa de Ciencia y Técnica e investiga en la Institución Oceanográfica Scripps, donde prepara su tesis sobre tomografía acústica del océano. Natural de Grecia, Tsipis se trasladó a los Estados Unidos en 1954; allí estudió ingeniería eléctrica y física. Titulado por las universidades de Rutgers y de Columbia, entró en el departamento de física del MIT en 1966.

RONALD G. PRINN ("Los volcanes y nubes de Venus") enseña en el departamento de ciencias terrestres, atmosféricas y planetarias del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Cursó química y matemáticas puras y aplicadas en la Universidad de Auckland, Nueva Zelanda. Es doctor en química por el MIT donde ha desempeñado varios cargos desde 1971. En 1981 fue profesor invitado de la división de ciencias geológicas y planetarias del Instituto de Tecnología de California.

CARLO M. CROCE y GEORGE KLEIN ("Translocaciones cromosómicas y cáncer humano") son biólogos. Croce da clases en el Instituto de Anatomía y Biología de Filadelfia y Klein enseña biología de los tumores en el Instituto Carolino de Estocolmo. Carlo M. Croce nació en Milán y se doctoró en medicina por la Universidad de Roma, en 1969, mientras trabajaba con Giuseppe Andres en el Instituto de Clínica Médica. Es también profesor de genética humana de la Facultad de Medicina de la Universidad de Pennsylvania y director adjunto del Instituto Wistar. Klein es húngaro de Budapest. Se doctoró en medicina, en 1951, por el Instituto Carolino, del que es hoy jefe de su departamento de biología de los tumores. Es miembro de la Real Academia Sueca de Ciencias y editor de *Advances in Cancer Research* y *Advances in Viral Oncology*.

DANIEL Z. FREEDMAN y PETER VAN NIEUWENHUIZEN ("Las dimensiones ocultas del espacio-tiempo") son, respectivamente, profesor de matemáticas aplicadas del Instituto de Tecnología de Massachusetts y profesor del Instituto de Física Teórica de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook. Freedman cursó la licenciatura en la Universidad Wesleyan, recibiéndose de doctor en física, en 1964, por la de Wisconsin en Madison. En 1968 se incorporó al claustro de Stony Brook; en 1980 se trasladó al MIT. Van Nieuwenhuizen, que es doctor en matemáticas y física por la Universidad de Utrecht desde 1969, se trasladó en 1975 a Stony Brook, donde colaboró con Freedman y Sergio Ferrara en los trabajos que condujeron al descubrimiento de la supergravedad, un año más tarde.

HAL WHITEHEAD ("Por qué saltan las ballenas") es profesor adjunto del Instituto de Ciencia de los Océanos Fríos de Terranova, donde ha permanecido desde 1981. Criado en Inglaterra, hijo de una familia de navegantes a vela, vio por primera vez ballenas en 1974 cuando, después de recibir su grado de licenciado en matemática pura por la Universidad de Cambridge, navegaba en un pequeño bote de vela de Connecticut a Terranova, bordeando la costa de Nueva Escocia. Después de colaborar algún tiempo con Roger Payne, a la sazón en la Sociedad Zoológica de Nueva York, retornó a Cambridge. Allí obtuvo un diploma en estadística matemática, en 1977, por su disertación titulada "Análisis estadístico del desarrollo del comportamiento del juego en los gatitos". En 1981 se doctoró en zoología, también por Cambridge, con un trabajo sobre el comportamiento y la ecología de las ballenas jorobadas.

LUIS C. PEREZ y FRANCISCO J. SANCHEZ-PALENCIA ("Yacimientos auríferos ibéricos en la antigüedad") comparten un mismo interés por el tema que desarrollan desde dos ópticas distintas: la del geólogo, el primero, y la del arqueólogo, el segundo. Pérez se formó en la Universidad Complutense de Madrid, doctorándose por la de Oviedo en 1977 con una tesis sobre sedimentos auríferos de la cuenca del Duero y su prospección. En la Facultad de Filosofía y Letras de la Complutense se doctoró también Sánchez-Palencia con una tesis complementaria: la explotación del oro de Asturias y Gallaccia durante la Antigüedad. Pérez trabaja hoy en la British Petroleum Minera de España, S.A., y Sánchez-Palencia prosigue sus excavaciones en el norte español.

S. THOMAS PICRAUX y PAUL S. PEERCY ("Implantación iónica de superficies") trabajan en los laboratorios nacionales Sandia. Picraux es supervisor de la división de investigación sobre interacciones ion-sólido y Peercy dirige el departamento de investigación sobre implantación de iones y física de la radiación. Picraux cursó la licenciatura en ingeniería eléctrica en la Universidad de Missouri, que terminó en 1965, y se doctoró en ingeniería y física por el Instituto de Tecnología de California; durante un año disfrutó de una beca Fulbright para estudiar física en la Universidad de Cambridge. Investigó en el laboratorio nuclear de Chalk River en 1967 y 1968 e ingresó en Sandia en 1969. Picraux es miembro de la Sociedad Americana de Física. Peercy se recibió de doctor por la Universidad de Wisconsin en Madison, en 1966, e inmediatamente entró en los laboratorios que la compañía Bell tiene en Murray Hill, New Jersey. Ingresó en Sandia en 1968. Peercy es presidente de planificación de la Sociedad de Investigación sobre Materiales.

ERIC BLOCK ("Química del ajo y la cebolla") es profesor de química de la Universidad estatal de Nueva York en Albany. Licenciado en ciencias por el Queens College de la Universidad municipal de Nueva York en 1962, se doctoró en química por Harvard, en 1967. Trabajó en la Universidad de Missouri desde 1967 hasta 1981. En la actualidad disfruta de una beca de la Fundación Guggenheim.

Hace...

José M.ª López Piñero

... trescientos cincuenta años

Bernabé Cobo residía en la casa profesa de la Compañía de Jesús en la ciudad de México. Allí estuvo en relación con el cosmógrafo portugués José de Moura Lobo, que había ido dos veces a China, una por Oriente y otra por Nueva España, quien le informó de las noticias que había recogido acerca de la comunicación de los continentes americano y asiático. Por otra parte, Cobo acababa de realizar un viaje científico con motivo de las gravísimas inundaciones que había sufrido la capital novohispana. Recorrió el gran valle de México para estudiar el desagüe existente y ver si podría hacerse otro mejor, de todo lo cual informó detenidamente en una de sus relaciones.

Nacido en 1580 en la localidad jiennense de Lobera, Bernabé Cobo marchó a las Indias en busca de fortuna el año 1596, cuando todavía era un adolescente. Tres años más tarde, se matriculó en el Colegio de San Martín, de Lima, que regentaban los jesuitas. Ingresó como novicio de la Compañía de Jesús en 1601 e hizo la profesión solemne de los cuatro votos en 1622. Residió en diversas casas que los jesuitas tenían en varias zonas del Perú e hizo desde ellas numerosos viajes, lo que le permitió conocer directamente la mayor parte del virreinato. Hacia 1613, comenzó a preparar una gran *Historia del Nuevo Mundo* al principio solamente con materiales peruanos. En 1629, sin embargo, sus superiores le autorizaron a que se trasladara a Nueva España, donde completó sus indagaciones, viajando durante trece años por México y Centroamérica. De regreso al Perú, terminó, por fin, su *Historia* en 1653, tras cuatro décadas de trabajo. El año 1657 falleció en Lima.

La gran obra de Cobo no fue impresa en su tiempo. En 1804, Antonio José Cavanilles publicó algunos fragmentos. Noventa años más tarde, Marcos Jiménez de la Espada editó completa la primera parte, que corresponde a la historia natural y a lo que hoy llamaríamos etnografía. De la segunda parte, de contenido histórico y geográfico, solamente se conservan los capítulos referentes a la fundación de Lima. Se ha perdido enteramente la tercera que, entre otras cosas, se ocupaba de las Filipinas y de la navegación a las Indias.

La primera parte de la *Historia del Nuevo Mundo* comprende catorce libros. El primero es un mero resumen de cosmografía general, de acuerdo con las doctrinas tradicionales. Mayor interés tiene el segundo y el tercero, consagrados respectivamente a la geografía física y a los minerales de América y, en especial, del Perú. Hay que destacar en ellos los capítulos relativos a los climas, los volcanes y los terremotos, así como los referentes a las minas. También son dignas de mención sus observaciones acerca de los fósiles, sobre cuya génesis aventuró Cobo una tosca interpretación: "La misma tierra, en algunas partes, con la virtud e influencias del clima y con las excelencias que se le mezclan, se viene a convertir en dura piedra, de que yo he visto la experiencia; porque en esta ciudad de Lima me dieron una piedra cortada de una cantera que se halló algunos estados debajo de la tierra, la cual tenía dentro de sí encajados huesos humanos, de donde cuantos la vían afirmaban que no podía haber sucedido aquello de otra manera, sino que, siendo primera tierra, y cuajándose después en piedra, se quedaron los huesos encerrados en ella.

"Item, de la arena de algunas riberas de ríos y lagos se forman a veces piedras, lo cual he yo observado; porque, estando una vez sentado con otras personas en la ribera de una grande laguna, tomando acaso en la mano algunas guijas, notamos que se desmenuzaban y deshacían fácilmente; y para experimentar si las demás eran de aquella calidad, fuimos partiendo algunas, y hallamos que unas estaban tan tiernas, por acabar de formarse de la arena, que con sólo apretarlas con los dedos se desmoronaban; y otras un poco más duras, de suerte que si no era dándoles con una piedra no se deshacían; y otras, que estaban ya perfectamente cuajadas, tan recias, que servían de partir con ellas las otras, sin que ellas se quebrasen."

El aspecto más sobresaliente de la obra de Cobo es, sin embargo, la botánica, tema de los libros cuarto al sexto –que tratan de las plantas propias de América– y de la mayoría del décimo, dedicado a los vegetales y animales introducidos por los españoles en el Nuevo Mundo. Cobo ofrece el primer estudio detallado de la flora del Perú, que contiene, entre otras, la primera noticia acerca de la quina o "árbol de calenturas": "En los términos de la ciudad de Loja, diócesis de Quito, nace cierta casta de árboles grandes y que tienen la corteza como de canela, un poco más gruesa, y muy amarga; la cual, molida en polvo, se da a los que tienen calenturas y con sólo este remedio se quitan. Hánse de tomar estos polvos en cantidad de peso de dos reales en vino o en cualquiera otro licor poco antes que dé el frío. Son ya tan conocidos y estimados estos polvos, no sólo en todas las Indias, sino en Europa, que con instancia los envían a pedir de Roma".

Cavanilles ya puso de relieve la gran altura de Cobo como botánico descriptivo: "Como se proponía describir los vegetales con exactitud, los observaba repetidas veces y en temperaturas muy diversas, y por lo mismo notó que sus tamaños, flores y hasta la forma de sus hojas solían variar, de modo que era muy difícil, cuando no imposible, reconocerlos y determinarlos. Verdad inconcusa, y mucho más en aquellos tiempos, en que se ignoraba la existencia, modificaciones y empleo de los órganos sexuales, como igualmente las diversas, bien que constantes, formas de los pericarpos, y la fábrica interior de las semillas. También notó que una misma planta tenía varios nombres en diversas provincias, resultando de aquí falsas especies, en perjuicio de la ciencia; y para evitarlo en lo posible, indagó los que tenía cada vegetal en las lenguas quichua y aymará, los cuales ponía al describirlo, añadiendo el sitio en que crecía, sus virtudes y usos económicos. Imitó en esto Cobo a sus predecesores y coetáneos, mas no en las descripciones: fueron las de aquéllos oscuras y limitadas a la forma de raíces y hojas comunes muchas veces a plantas de diversas virtudes; las de Cobo, al contrario, perspicuas y tan completas como se podían exigir de uno que no conocía los sexos ni su oficio. Dio muchas, a la verdad, diminutas, pero en otras desplegó la fuerza de su genio observador y filosófico, y elevando su estilo a una altura antes desconocida, pintó los vegetales con colores tan vivos y con caracteres tan sólidos y constantes, que hoy día los puede reconocer cualquier botánico. Todas las descripciones de esta naturaleza están marcadas con el sello duradero de la verdad y de la más prolija exactitud; y si empleó en hacerlas cuarenta años es porque se propuso escribir para la inmortalidad".

Entre las descripciones de Cobo que Cavanilles destaca figura la de la "flor de la Trinidad", llamada en nahuatl "oceloxochitl" y que el botánico valenciano identificó como la *Ferraria pavonia L.*: "De las flores naturales de las Indias, la más vistosa que hay, a juicio de muchos, es la que llamamos *de la Trinidad*. La mata de que nace es alta dos o tres palmos; echa las hojas muy parecidas a las de la palma cuando muy

pequeña antes que haga tronco; por las cuales a lo largo discurren unos nervios. El vástago en que la flor nace es semejante al del lirio en el tamaño, es muy verde, redondo y liso. La flor tiene un pezoncillo, con que está asida al tallo, de cuatro o cinco dedos de largo, delgado, y liso. La flor se forma de tres hojas grandes, que cada una tiene de largo cuatro dedos; están puestas en triángulo perfecto, desta suerte: desde el pezón a la mitad están juntas, y por la parte de dentro cóncavas, de manera que todas tres juntas forman una como media bola, del tamaño de media lima, si bien no con tan perfecta redondez, por la concavidad que cada hoja hace, con que se distinguen como tres cáscaras de nueces pegadas; desde la mitad hasta la punta se apartan estas hojas, abriéndose hacia afuera, y se va estrechando hasta rematar cada una en su punta; y estas tres puntas vienen a quedar en igual distancia unas de otras, de suerte que de una punta a otra hay distancia de medio jeme. La sustancia destas hojas es tan delgada, sutil y delicada, como la de las hojas de la rosa. El color es vario, por de fuera entre amarillo y colorado, que declina más (a) amarillo, y por de dentro, desde la mitad por donde se juntan hasta la punta, es finísimo colorado, y la otra mitad que forma la concavidad sobredicha, es de unas vistosísimas manchas de amarillo y colorado, como piel de tigre. Dentro destas tres grandes hojas nacen otras tres menores, iguales en la sustancia a la primera y en proceder en forma triangular; pero de tal modo, que su nacimiento de cada una es en la juntura de las grandes, y así proceden entremetidas con ellas. El color destas segundas hojas es todo jaspeado como el sobredicho. De en medio desta flor nace un vastaguillo como el de la azucena, largo casi cuatro dedos, poco más delgado que el pezón de la misma flor; es liso y de un encarnado claro, y en la cumbre remata en seis hilitos que nacen dél con tres como botoncillos alrededor más larguillos y delgados que granos de cebada, cubiertos de un polvillo como oro molido. Ella es flor hermosísima y fuera más estimada si fuera olorosa, que no lo es; y cogida por la mañana, a la tarde está ya marchita. Hásele dado el nombre que tiene por su composición de ternos de hojas y botoncillos, la cual ha poco tiempo que se trajo a este reino del Perú. En la Nueva España, de donde debe de ser natural, la llaman los indios *oceloxochitl*, que quiere decir flor de tigre. La raíz es como de puerro y buena de comer".

Cobo no se limita, sin embargo, a un nivel puramente descriptivo, sino que intenta estudiar la flora de manera sistemática, situando en primer plano el condicionamiento ambiental. No solamente se ocupa de la distribución de las plantas por "tierra y temples", sino también de los fenómenos de la aclimatación, observando, por ejemplo, los árboles europeos de follaje caduco que en América no pierden la hoja y los cambios de floración y fructificación. También dedica un amplio capítulo a "las causas por qué los animales y plantas que los españoles han traído a esta tierra se han aumentado y cundido tanto en ella".

La *Historia del Nuevo Mundo* dedica casi cuatro de sus libros a la fauna. Desde el séptimo al noveno se ocupan de los animales propios de América y parte del décimo –como acabamos de decir– de los introducidos por la colonización española. Su capacidad de observador se refleja no sólo en los mamíferos, aves o reptiles, sino también en los insectos, en general muy poco estudiados por los naturalistas anteriores. Véase, por ejemplo, parte de su descripción de la nigua (*Sarcopsylla penetrans* L.):

"A la otra suerte de pulgas llamamos niguas, atribuyéndoles el nombre común que los indios de la isla Española daban a las pulgas en común. Son, pues, las niguas ciertas pulgas tan pequeñas, que casi son invisibles; porque no son tan grandes como liendres, redondillas, del mismo color que las pulgas ordinarias; no andan saltando como las otras, sino corriendo ligerísimas, y no pican y pasan adelante como los otros animales que nos molestan, sino que lo toman más despacio, y rompiéndonos el cuero, se meten por la carne hasta esconderse y quedar sepultadas en ella, adonde van creciendo a costa de nuestra sustancia y sangre desta suerte. Cría la nigua en torno de sí un hollejito redondo, blanco, muy sutil; y dentro dél unos huevecitos asimismo blancos más menuditos que liendres; a los tres o cuatro días ha crecido ya del tamaño de una cabeza de alfiler, y a los quince o veinte como un garbanzo; y cuanto más va creciendo y engordando, tanto más va ocupando en lo interior de la carne, de modo que por de fuera queda la parte donde ella está pareja con los demás del cuero, como si no hubiera dentro nada, sin embargo que se echa bien de ver la nigua. Cuando se saca entera, parece una perfecta perla, dejando en la carne un escaje y vacío de su tamaño. Si no se saca con tiempo, se vienen a engendrar de todos aquellos huevecillos otras tantas niguas. Háse de tener cuidado al sacarla, que salga toda entera, y si el alfiler con que ordinariamente se sacan la rompiere, se procurará que no quede dentro de la carne parte della; porque si queda, o se vuelven a criar otras en el mismo lugar, o se hace materia.".



En su Historia del Nuevo Mundo, *Bernabé Cobo dio la primera noticia u ofreció la primera descripción precisa de numerosas especies botánicas y zoológicas. Entre ellas figuran el árbol de la quina –hasta entonces confundido con diversas plantas medicinales también de origen americano– y el paca, roedor de carne sabrosa que vive en casi toda Sudamérica. Los grabados reproducidos proceden del* Museo Pintoresco de Historia natural *(Madrid, 1852-1858).*

Cobo describió por vez primera varias especies de mamíferos, entre ellos, el paca (*Agouti paca* L.) y la vicura (*Didelphis marsupialis* L.), y rectificó errores de descripciones anteriores, como el supuesto ombligo existente en el lomo del saino común (*Dicotyles torquatus* L.), que demuestra que es una glándula secretora del humor pestilente con el que dicho animal se defiende. Anotemos, para concluir, que los cuatro últimos libros de esta parte de la *Historia del Nuevo Mundo* están consagrados a los indios.

Cumplimiento de los acuerdos sobre control de armamentos

Las actividades militares de la Unión Soviética pueden controlarse desde Occidente a través de una amplia gama de técnicas de detección remota, entre otras, las fotografías de alta resolución tomadas desde satélites

David Hafemeister, Joseph J. Romm y Kosta Tsipis

La reciente decisión de los Estados Unidos y la Unión Soviética de reanudar las negociaciones bilaterales sobre control de armamentos vino anunciada por declaraciones gubernamentales en las que se destacaba la necesidad de detener, si no invertir, el sentido del crecimiento de sus respectivos arsenales y sistemas de armamento. En el clima actual de mutuo recelo, resulta imprescindible que cada bando pueda, unilateralmente, constatar el cumplimiento de los términos suscritos en los acuerdos que salgan de las nuevas negociaciones. La verificación exige que cada parte disponga de medios objetivos y fiables de vigilar la actividad militar de la otra. Con ese propósito, han desarrollado un abanico amplio de sistemas de obtención de información a distancia: se trata de los, así llamados, medios técnicos nacionales de verificación.

No hay que mezclar la cuestión de la verificación con el problema legal de si la constatación de una actividad denuncia de suyo la violación del tratado, ni con el tema político de qué medidas tomar tras el descubrimiento de una violación. Pero tampoco debemos confinarla entre los asuntos estrictamente técnicos. En los Estados Unidos, la verificación se ha convertido en el tema central del recurrente debate político sobre pros y contras de los tratados firmados o propuestos sobre control de armamentos. Los contrarios a cualquier tratado argumentan que los Estados Unidos no pueden vigilar el cumplimiento soviético con la suficiente fiabilidad para mantener la integridad nacional dentro de las cláusulas del tratado, mientras que los partidarios se apoyan en el enunciado opuesto.

La cuestión de si los Estados Unidos pueden o no someter a control el cumplimiento de un tratado cabe resumirla en dos más finas. En primer lugar, en qué nivel de clandestinidad la actividad soviética amenazaría la seguridad norteamericana; en segundo lugar, ¿es capaz de detectar ese nivel de actividad el sistema estadounidense de verificación?

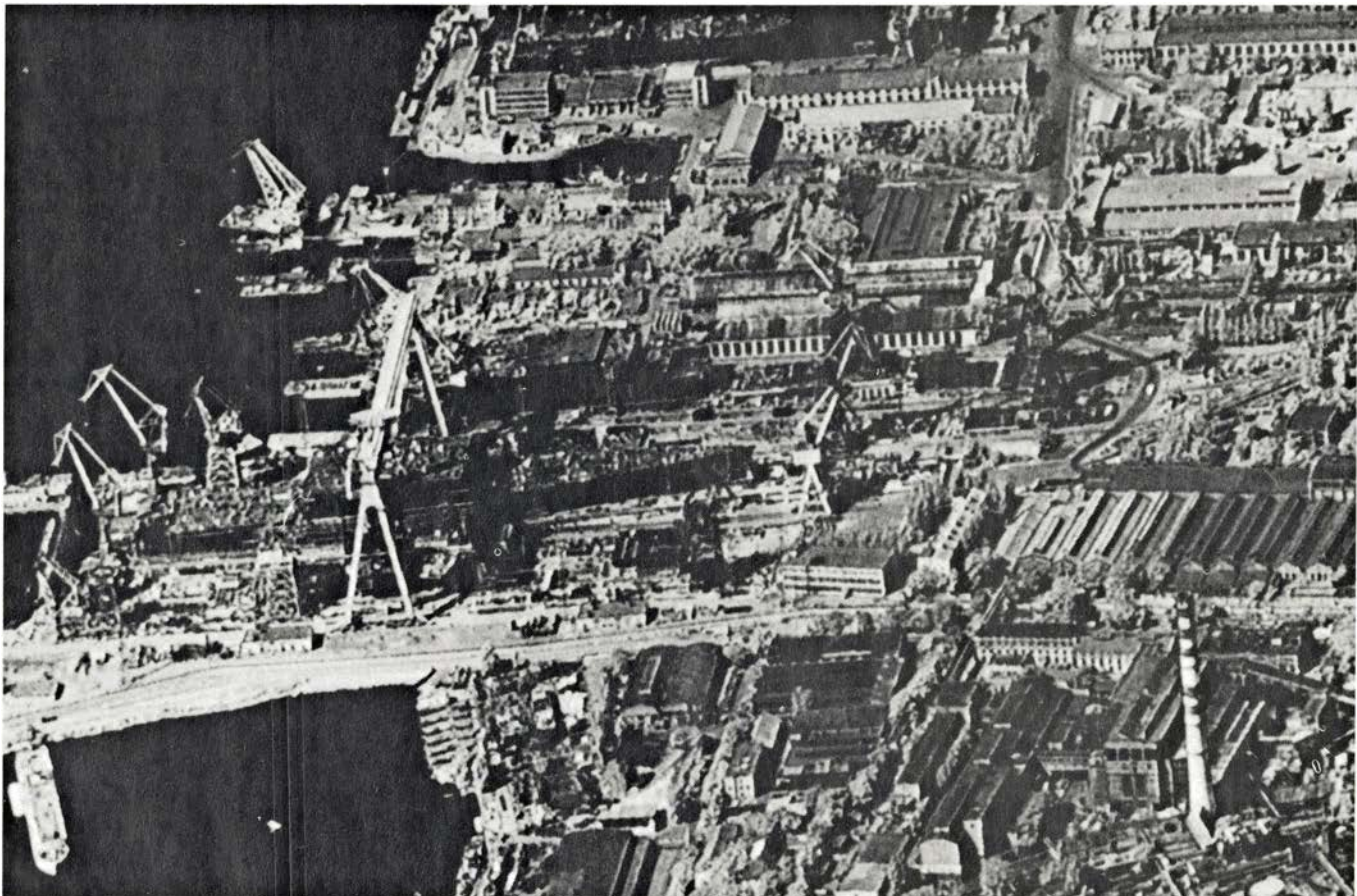
¿Qué técnicas se requieren para seguir el desarrollo, ensayo, fabricación y despliegue de un sistema de armamento? Los primeros signos detectables del desarrollo podrían desprenderse del contenido de las comunicaciones entre los funcionarios y científicos que trabajen en el arma; podría interceptarse parte de las señales controlando las ondas de radio. O hacerse un espía con sus planos. En 1979, William J. Perry, a la sazón subsecretario de defensa para investigación e ingeniería, afirmaba: "controlamos la actividad de los despachos de diseño [de misiles soviéticos] con la eficacia suficiente para haber podido predecir todos los ICBM [misiles balísticos intercontinentales] antes, incluso, de que llegaran a la rampa de ensayo... Hasta ahora, siempre logramos detectar la existencia de un ICBM antes de las pruebas".

Salida el arma del laboratorio, podemos aprovechar el espectro completo de energía acústica y electromagnética para recabar información sobre él. Los detectores de luz visible, como los instalados a bordo de satélites de fotorreconocimiento, "ven" directamente el arma; los detectores de infrarrojo de satélites captan el calor emitido por los gases de combustión de los cohetes impulsores durante los ensayos; los radares siguen la trayectoria del arma en el aire; el sonar lo hace en el agua y, los sismómetros, acusan y valoran las pruebas nucleares subterráneas.

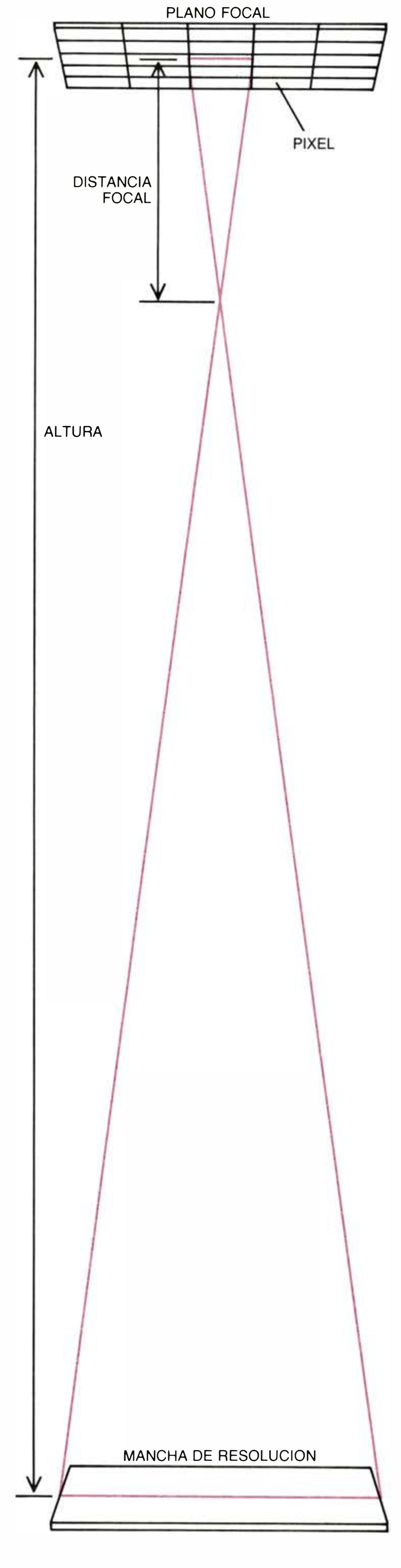
Al ensayo exhaustivo del arma sigue su producción. Lo que implica un estruendoso movimiento de transporte hacia y desde las instalaciones de fabricación, pasos que descubre la luz visible o la radiación infrarroja. Por último, el despliegue operativo y entrenamiento de personal con la nueva arma es, también, susceptible de seguimiento. La diferencia esencial en la observación de estos procesos es que, en general, el ensayo y la fabricación deben detectarse cuando se producen, mientras que el despliegue implica actividades que perduran años, expuestas a quedar al descubierto en cualquier momento una vez iniciadas.

Para denunciar la violación soviética de un tratado, no hay que tener datos de todas las fases del proceso que culmina con el despliegue del arma. Basta conocer parte de la actividad involucrada, si se advierte con el detalle suficiente, para desentrañar su propósito y revelar la violación del tratado. Ese proceso de detección e identificación se ve facilitado por la sinergia natural que se establece entre las distintas posibilidades que Estados Unidos tiene de obtener información de lo que ocurre allende la frontera soviética. La información recabada por sistemas de control (pensemos en la intercepción electrónica de mensajes) indica a otros sistemas (satélites de fotorreconocimiento, por ejemplo) hacia dónde deben dirigir su atención y qué es lo que deben buscar. Más aún, la información fragmentaria ofrecida por un sistema, que por sí sola podría resultar insuficiente, puede revelar la naturaleza de una actividad sostenida al ponerla en relación y encajarla en los fragmentos que dan otros sistemas de seguimiento.

Acoplar adecuadamente las piezas del rompecabezas resulta tan importante como obtenerlas. La tarea no está exenta de ambigüedades y cabos sueltos. Algunas actividades detectadas pu-



1. **IMAGENES TOMADAS POR SATELITE** y sometidas a un procesamiento por ordenador. Revelan la construcción, por parte de la armada soviética, de su primer portaviones propulsado por energía nuclear, en un astillero del Mar Negro. El buque, que desplazará 75.000 toneladas, probablemente reciba el nombre de *Kremlin* al culminar su puesta a punto, en 1994. Se construye en dos secciones; la de proa, de 264 metros de longitud, y la de popa, de 73, que se distinguen en dos gradas adyacentes bajo una gigantesca grúa de caballete. Las fotografías aparecieron por primera vez en *Jane's Defense Weekly*.



dieran no observarse con la evidencia necesaria para denunciar la violación de las cláusulas de lo pactado. Otras actividades, si bien detectables con gran detalle, quizá no podrían asegurarse que fueran violaciones si las cláusulas pecaran de imprecisión. Los esfuerzos de la comunidad científica se han encaminado a reducir esas incertidumbres desarrollando técnicas de vigilancia que ofrecen imágenes y registros muy detallados de las señales interceptadas, en lo posible libres de ruido.

De identificar las actividades y acontecimientos que revelen una clara continuidad y produzcan cambios visibles en el medio se ocupan los satélites de fotorreconocimiento, esto es, la toma periódica de imágenes del interior de la Unión Soviética por medio de sistemas ópticos transportados en satélites de órbita relativamente baja. La fotografía reiterada de un mismo lugar, en las mismas condiciones, descubre si se han producido cambios. Si se tiene acceso a los detalles suficientes, se identifica incluso qué actividad provocó el cambio. Un tipo especial de cámara recoge la luz que la escena refleja y forma una imagen compuesta por un patrón de puntos claros y oscuros (o de color) en una superficie fotosensible de registro. Cada punto de esos se denomina celdilla, *pixel*, o elemento de imagen. El tamaño de los pixeles, la distancia focal de la cámara y la altura del satélite determinan la resolución del sistema, esto es, el tamaño del menor objeto situado en tierra que puede distinguir el sistema [*véase la figura 2*]. Cuanto más fino sea el detalle que dé una imagen, tanto más fácil resultará detectar los cambios que se produzcan entre dos secuencias; más sutiles, también, los cambios susceptibles de ser advertidos. El aumento de la resolución incrementa el contenido informativo de la imagen. El aumento del contenido informativo eleva la probabilidad de que llegue a identificarse la actividad causante de los cambios.

2. RESOLUCION TERRESTRE de un satélite de fotorreconocimiento, definida de acuerdo con el diagrama esquemático de la izquierda. El diámetro de una mancha de resolución del escenario terrestre (que simbolizaremos por *r*) viene dado por la fórmula $r = (h/f)d$, donde *h* indica la altura a que se encuentra el satélite, *f* es la distancia focal del sistema óptico y, *d*, el diámetro de un pixel, o elemento unidad del cuadro, en el medio de registro. (Todas las unidades suelen calcularse en centímetros.) El tamaño de un pixel vendrá dado por la granulación de la película fotográfica o el tamaño de una celda individual del aparato de carga acoplada (CCD) dispuesto en el plano focal del sistema óptico para registrar la imagen. La mancha de resolución de la generación actual de satélites de los Estados Unidos ronda los 10 centímetros.

Muestra la experiencia que la presencia de un objeto en una escena se descubre si ese objeto es, cuando menos, del tamaño de la mancha de resolución. Si es ocho veces mayor, puede reconocerse (por ejemplo, un carro o un camión), y si es 12 veces mayor puede identificarse (digamos, un viejo carro soviético T-62 o el moderno T-72). Se dice que el tamaño de la mancha de resolución de los satélites de reconocimiento norteamericanos es de 10 centímetros. Así, cabe presumir que esos sistemas descubran cualquier objeto de una longitud similar que se halle en tierra e identifiquen cuanto mida 1,5 metros de diámetro. Facilita aún mucho más la identificación de objetos y actividades el disponer de imágenes obtenidas por la reflexión de radiación de distintas longitudes de onda. Combinando imágenes de una escena generadas por la radiación infrarroja y ultravioleta, además de la luz visible, los analistas pueden recabar más información de los objetos, e incluso detectar los que se hayan camuflado.

Formada la imagen de la escena terrestre en la cámara se registra y transmite a las estaciones terrestres para su análisis e interpretación. El registro se hace sobre película fotográfica o en un montaje bidimensional de detectores fotosensibles, denominados dispositivos de carga acoplada, o CCD (por *charge-coupled devices*). Los detectores de ese tipo transforman en una cantidad proporcional de carga eléctrica la luz que reciben durante un breve, e invariante, período temporal. El patrón de luz crea así una réplica eléctrica de sí mismo en el montaje de detectores. El patrón se convierte luego en secuencia de dígitos, que se transmite a la estación receptora terrestre. Los equipos de ésta transforman en imagen la réplica eléctrica del patrón de luz. Se repite luego el procedimiento y se registra otra imagen.

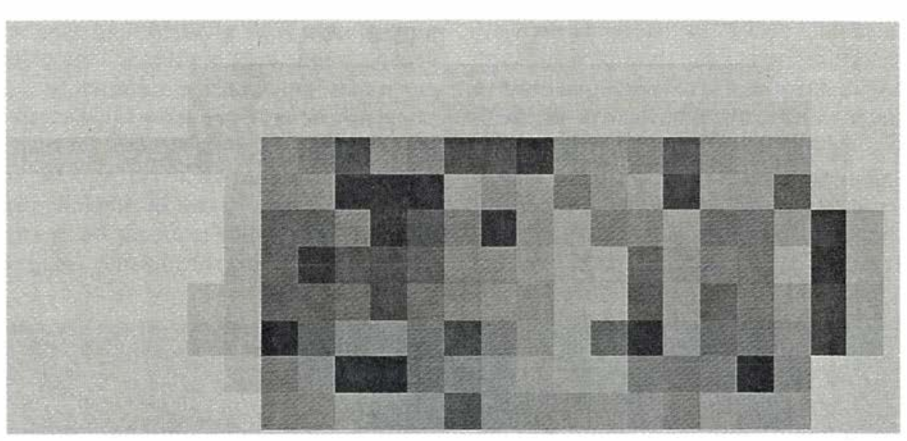
En los sistemas de grandes distancias focales, las distribuciones electroópticas pueden alcanzar tamaños de pixel comparables a las mejores películas fotográficas. Además, presentan múltiples ventajas sobre la película. Las imágenes registradas en películas pueden transmitirse de dos maneras: procesarse la película a bordo del satélite, de modo similar a como las cámaras Polaroid revelan sus películas, en cuyo caso se transmite luego la imagen por medio de un sistema muy semejante al que emplean las cámaras de televisión; o bien, lanzarse la película desde el saté-

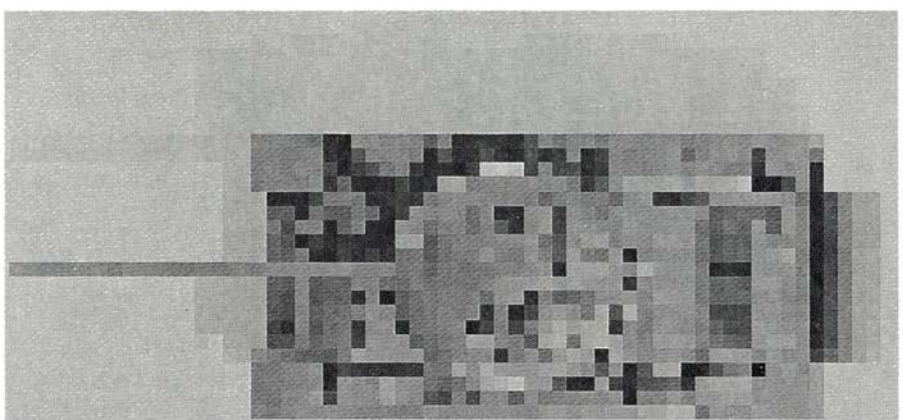
lite, a bordo de cápsulas especiales, que retornan a la atmósfera y, con ayuda de paracaídas, descienden lentamente hasta que las pesca, en vuelo, un avión dotado de los mecanismos apropiados. Ambos métodos provocan retrasos en la recepción de las imágenes y limitan la vida útil del satélite, pues tarde o temprano se agotará la película de las cámaras. Las distribuciones fotosensibles instaladas en satélites norteamericanos transmiten en tiempo real, con ayuda de un satélite intermedio, las imágenes de las escenas que sobrevuelan: se dispone de la imagen en el momento de su observación. Las imágenes recreadas en tierra poseen una gama dinámica mucho más amplia que las obtenidas por técnicas fotográficas, por lo que no son tan sensibles a los grandes cambios de intensidad de la iluminación.

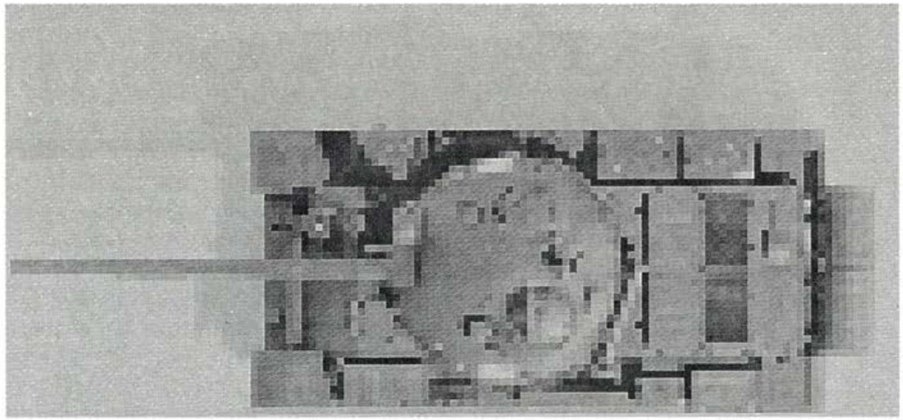
Una vez recibida la imagen de una escena en la estación terrestre, puede aquí mejorarse su calidad óptica con ayuda de ordenadores rápidos y procesadores especializados. La técnica que lo procura se llama procesamiento digital de la imagen. En este sentido, la borrosidad de las líneas y formas de una imagen, causada por la turbulencia, movimientos no compensados, sobreexposición o falta de contraste, puede eliminarse alterando artificialmente las áreas grises y exagerando las negras y blancas. El procesamiento de las imágenes permite transformar los patrones característicos (como la apariencia de un silo de misiles observado desde el cielo) en imágenes de la superficie terrestre, o el retoque de escenas estropeadas por la interposición de nubes.

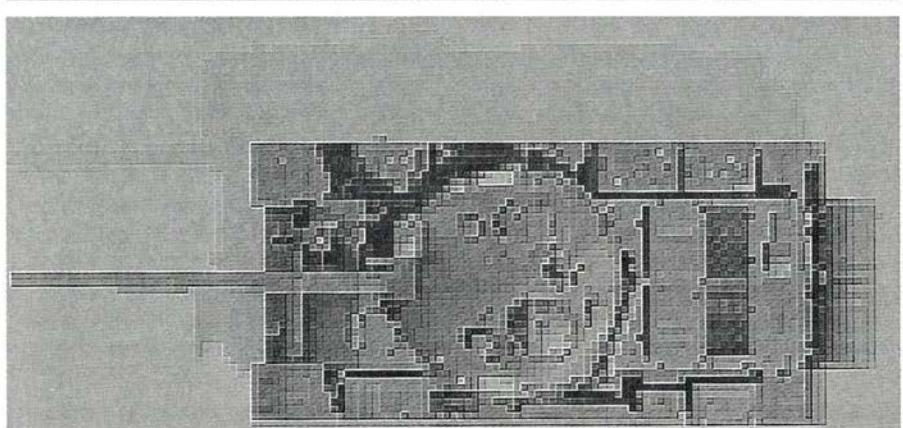
Las capacidades de recogida de información por parte de los satélites de fotorreconocimiento poseen dos limitaciones: cualquier sistema que emplee luz visible no podrá actuar de noche y ni la luz visible, ni la radiación ultravioleta e infrarroja, atraviesan la cubierta nubosa. Una climatología adversa y la noche polar podrían impedir, pues, la observación de extensas zonas de la Unión Soviética durante largos períodos. Se ha resuelto el problema acudiendo a otro segmento del espectro electromagnético: las ondas de radio.

Puesto que las ondas emitidas por los sistemas de radar son de longitud superior a las de la luz visible, resultan poco afectadas por la cubierta nubosa o la lluvia. Pueden, por tanto, "iluminar" el objetivo a despecho de la situación meteorológica. Al generar su propia radiación reflejada, actúan a cualquier









3. SIMULACION DEL EFECTO DE RESOLUCION CRECIENTE a través de esta secuencia de imágenes de un modelo en plástico de un carro soviético. Se barrió ópticamente una fotografía del modelo para obtener un registro digital en cinta magnética. La información almacenada en la cinta se procesó luego para reconstruir de nuevo la imagen en tres tamaños diferentes de pixel, correspondientes, más o menos, a la resolución en que el objeto se detectaría como un camión (*arriba*), a la resolución en que se reconocería ya como un carro (*segunda, empezando por arriba*) y, por fin, a la resolución en que el carro descubierto se identificaría perteneciente al prototipo soviético T-62 (*tercera, empezando por arriba*). La imagen inferior reforzada se sometió a unas etapas de procesamiento adicionales que le destacaran los rebordes.

hora del día. La resolución de un sistema de radar es proporcional a la longitud de onda de la radiación que emite e inversamente proporcional a la longitud de la antena; así, las imágenes de radar de la superficie terrestre suelen ser de muy baja resolución. Cabe incrementarla haciendo que la antena, bastante pequeña, del satélite le parezca muy grande a la radiación, lo que se consigue aplicando el método conocido por radar de abertura sintética (SAR, por *synthetic-aperture radar*). Un satélite SAR combina el complejo procesamiento electrónico de las ondas reflejadas por el objetivo con el movimiento relativo del satélite respecto de la superficie de la tierra, alcanzando imágenes de radar de alta resolución [véase "Imágenes de radar de la Tierra desde el espacio", por Charles Elachi; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1983]. La resolución de una imagen SAR no alcanza las de las obtenidas con luz visible, pues existe un límite práctico al tamaño de la antena "virtual" que se le presenta a las ondas de radio. Sí es la



4. IMAGEN OBTENIDA POR RADAR de un remolino formado en el golfo de México; recoge la estela de un navío. Las variaciones de rugosidad de la superficie, asociadas al remolino y a la estela del barco, las registró el radar de abertura sintética del satélite *Seasat*. El procesamiento corrió a cargo del personal adscrito al laboratorio de propulsión a chorro del Instituto de Tecnología de California. La ventaja principal de los sistemas radáricos acoplados a satélites, encargados de misiones de vigilancia, es su capacidad de funcionamiento a cualquier hora y bajo cualesquiera condiciones atmosféricas.

suficiente, no obstante, para que Estados Unidos mantenga su control sobre muchas actividades realizadas en zonas de la Unión Soviética ensombrecidas por las nubes o cuya iluminación diurna dura escasas horas.

No es imprescindible colocar los radares en satélites para que suministren una información aprovechable. Los Estados Unidos conocen las pruebas de los misiles soviéticos gracias, sobre todo, a los radares transportados en barcos y aviones o instalados en tierra. He aquí, pues, un ejemplo claro de la sinergia creada por la amplia diversidad de posibilidades de seguimiento con que cuenta Estados Unidos. El disparo de prueba de los misiles balísticos rusos, que tiene lugar en las instalaciones de lanzamiento de Plesetsk y Tiuratam, en el Asia central, va precedido de múltiples movimientos: la alerta precoz de la proximidad de una prueba puede darla un satélite de fotorreconocimiento que tome imágenes del misil que se prepara en su rampa de lanzamiento. La señal para poner en marcha todos los sensores podría proceder de la intercepción de las comunicaciones o de los satélites de alerta precoz situados en órbitas geosincrónicas sobre el Ecuador; esos satélites "apuntan" hacia la Unión Soviética y detectan la radiación infrarroja emitida por los gases de escape en cuanto el misil supera cualquier cubierta nubosa que tape el campo de tiro. En ese momento, la detección de ondas de radio constituye la vía principal de información.

Radares potentes, instalados en tierra, siguen el movimiento del misil en sus distintas fases desde el instante de lanzamiento. El radar mide continuamente, y con gran precisión, la velocidad del misil, y por tanto su aceleración, determinando el desplazamiento Doppler que sufren las ondas reflejadas. Si la rampa de lanzamiento del misil se encuentra en lo más profundo del territorio soviético, de modo que no cabe la observación por medio de los radares convencionales instalados en tierra, Estados Unidos emplea radares que miran "por encima del horizonte". Se trata de dispositivos que proyectan haces a la ionosfera, que actúa a modo de espejo y los refleja al interior de la Unión Soviética. Los radares de ese tipo arrojan igualmente información útil acerca de la velocidad del misil.

Radiorreceptores instalados en tierra y a bordo de satélites de órbita elevada interceptan el haz de mensajes que el misil devuelve a las estaciones terrestres durante el ensayo; en ellos se informa de las características y el estado de diversas partes del misil. Esos mensajes, que se albergan bajo el nombre común de telemetría, ofrecen datos sobre la cantidad de combustible consumido, órdenes que el sistema de guía da al cohete y temperaturas y presiones que sufren los componentes del misil. Todas esas señales, que precisan los ingenieros para comprobar si el misil responde según su diseño, las interceptan también las instalaciones de seguimiento norteamericanas. Correlacionando esos datos telemétricos con la información acerca de los movimientos del misil que recogen los radares asentados en tierra, el espionaje occidental no sólo constata que la Unión Soviética ha ensayado un misil, sino que descubre también muchas de sus características. Los soviéticos codifican a veces las señales telemétricas de sus ensayos para que no las entiendan los analistas norteamericanos, práctica ante la cual han protestado éstos, pues el tratado SALT II, no ratificado, estipula que sólo pueden enmascararse las señales sin relación directa con la verificación del tratado. Sin embargo, aun sin tener acceso a los datos telemétricos codificados, Estados Unidos puede detectar el ensayo del misil soviético, a la vez que determinar propiedades de gran trascendencia sobre el comportamiento del ingenio balístico, como son el número de vehículos de reentrada que transporta.

La fase final del ensayo de un misil balístico es la vuelta de sus vehículos de reentrada a la atmósfera y su impacto en tierra. Puesto que las fuerzas que se generan en la atmósfera afectan a las trayectorias de vuelo de los vehículos de reentrada, la información sobre su comportamiento en esta fase terminal constituye un dato de capital importancia sobre la precisión del misil, valiosísimo para la Unión Soviética. Los rusos dirigen sus vehículos de reentrada hacia áreas de impacto habilitadas en la península de Kamchatka o en el Océano Pacífico central. Lo que ha obligado a los Estados Unidos a desarrollar una amplia gama de sistemas sensibles para el seguimiento de la vuelta de los vehículos de reentrada soviéticos hacia esas áreas. Distribuciones de radares en fase, muy precisas, que pueden detectar objetos del tamaño de una pelota de baloncesto a miles de kilómetros y seguir la trayectoria de centenares de esos objetos a la vez, radiorreceptores, telescopios infrarrojos y de luz visible equipados con cámaras y espectrómetros de barrido rápido registran distintas formas de la energía radiante emitida y reflejada por el vehículo de reentrada. Algunos de esos instrumentos se han instalado en la isla de Shemya, en el cumbre de la cadena de islas Aleutianas y en el atolón Kuajalein, en el Pacífico; otros los llevan buques y aviones, e incluso los hay a bordo de pequeños cohetes de escucha que se disparan anticipadamente a la llegada de los vehículos de reentrada.

Con todos estos datos, correlacionados e interpretados por los especialistas del ejército, Estados Unidos puede reconstruir, fiablemente, las características del arma ensayada. (Por ejemplo, ¿qué potencia tiene el lanzador? ¿Cuál es su alcance? ¿Cuánto pesan los vehículos de reentrada?) Otras propiedades se resisten mucho más a su identificación. La precisión, por ejemplo, sólo puede calcularse a través de interferencias estadísticas a partir de la trayectoria de vuelo y del punto de impacto de los vehículos de reentrada. Si los Estados Unidos desconocen cuál es el objetivo al que apuntan los vehículos de reentrada, su estimación de la precisión estará rodeada de incertidumbres. Como incierta es la determinación estadística de la fiabilidad de los ICBM y de los vehículos de reentrada soviéticos. Algunas características resultan extremadamente difíciles de establecer. La supuesta potencia del arma que vaya a instalarse en el vehículo de reentrada sólo puede barruntarse a partir del peso del vehículo. Con todo, los medios técnicos unilaterales de que dispone Estados Unidos ofrecen gran fiabilidad, y no sólo para detectar esos ensayos, sino también para suministrar a los norteamericanos gran cantidad de información acerca de las posibilidades y eficacia del arma ensayada.

Las cabezas nucleares que transportan los misiles deben desarrollarse apoyándose en pruebas subterráneas. Situación que se deriva del Tratado de Limitación de Ensayos, firmado por Estados Unidos, Gran Bretaña y la Unión Soviética, en 1963, que prohibía la ejecución de esas pruebas en la atmósfera. Las técnicas de detección necesarias para controlar los ensayos subterráneos se sirven de sismómetros que registran las ondas acústicas generadas por las explosiones, equipos de almacenamiento y ordenadores que analizan los datos. Las pruebas atmosféricas, de reanudarse, caerían bajo el fácil control de los satélites especiales, amén de otras técnicas, algunas descritas antes.

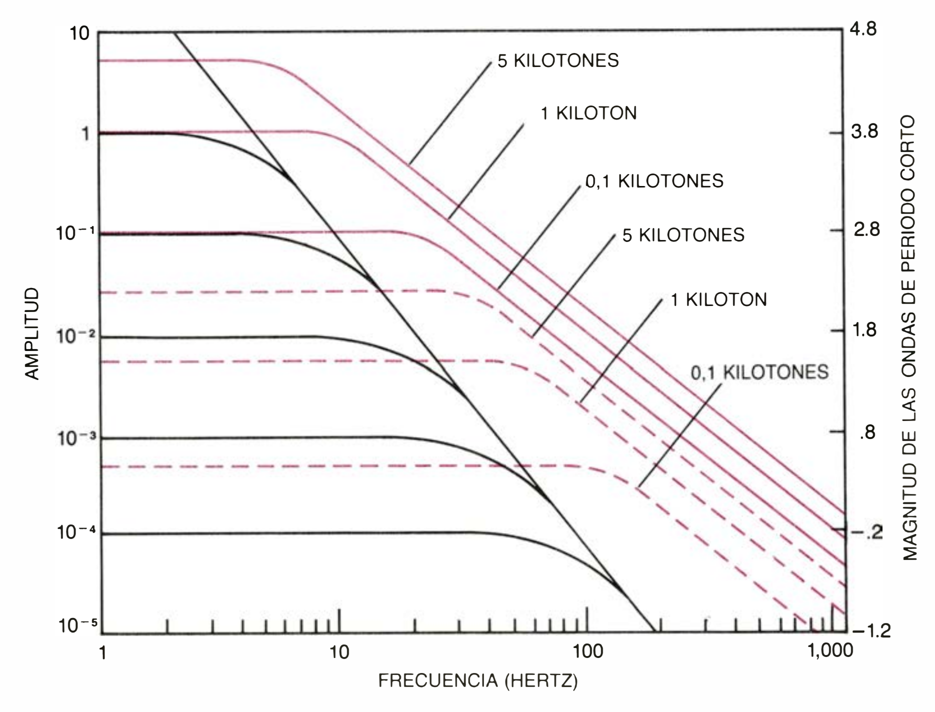
Las explosiones subterráneas generan ondas elásticas que se propagan a grandes distancias, a través de la superficie y de la corteza. La magnitud y el lugar de origen de esas ondas se determinan merced a las redes de sismómetros sensibles. Estos aparatos se hallan en estado permanente de operación, de modo que detectan y registran todos los temblores terrestres, incluidos los desencadenados por las explosiones.

La detección sísmica de pruebas subterráneas tenía pendiente un problema: dichas explosiones producen ondas elásticas bastante similares a las de otros muchos fenómenos, como terremotos naturales; las redes sismométricas registraban igual sus ondas. Existía, por tanto, el riesgo de que se tomara una explosión nuclear por terremoto, y a la inversa. Investigaciones ulteriores obviaron esa dificultad, salvo para el caso de las explosiones nucleares de baja potencia [véase "Verificación de una prohibición absoluta de pruebas nucleares", por Lynn R. Sykes y Jack F. Evernden; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1982]. Quedaban, no obstante, dos vías posibles para el engaño. Podía la Unión Soviética ensayar una pequeña carga nuclear durante un terremoto; las ondas sísmicas del terremoto enmascararían la señal generada por la detonación. Y, en segundo lugar, se creyó durante cierto tiempo que la energía liberada por un dispositivo de baja potencia podía amortiguarse si explosionaba en una cavidad subterránea amplia: la explosión no trascendería los confines soviéticos. Pero esa añagaza acaba de perder fuerza. Un equipo de geofísicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos en Menlo Park, California, ha desarrollado un método de detección que distingue explosiones nucleares de sólo un kilotón, o menos, sirviéndose de un refinado equipo sensor.

La nueva técnica de detección saca partido de la naturaleza de los terremotos, que son fenómenos dilatados; la energía acústica que emite se concentra, pues, en longitudes de onda largas. La explosión nuclear, por contra, es un fenómeno puntual, que libera al medio envolvente, de manera brusca, enorme cantidad de energía. Tanto su limitada extensión como su brevedad le fuerzan a liberar su energía en ondas mucho más cortas, de frecuencias superiores. Por mucho que coincida con un temblor sísmico, la frecuencia ondulatoria nos dirá que estamos ante una auténtica explosión nuclear.

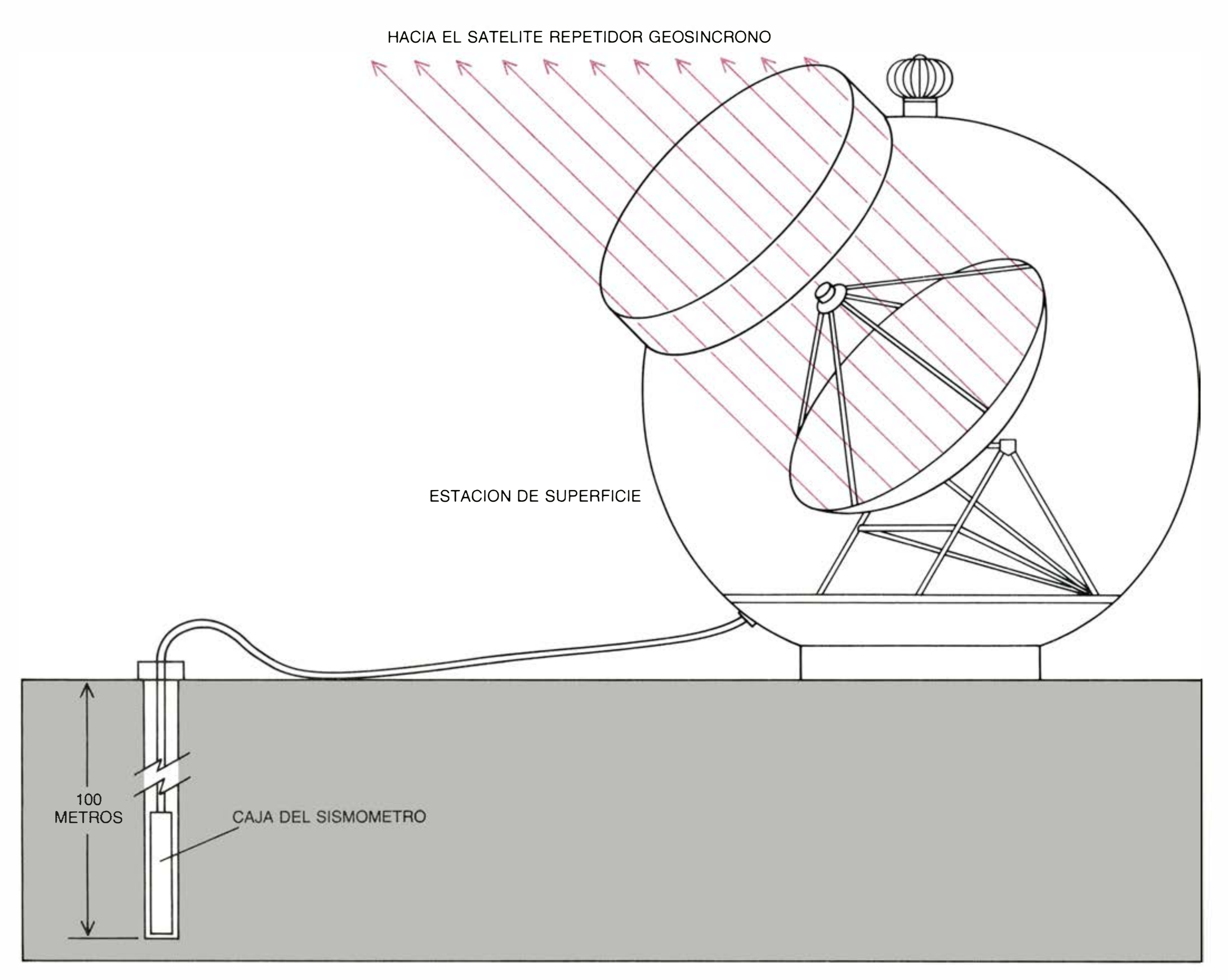
Veamos un ejemplo. Las ondas de un terremoto pueden enmascarar la señal de una explosión activada de un kilotón hasta frecuencias de 10 hertz [*véase la figura 5*]. Ahora bien, las ondas del terremoto no encierran energía detectable por encima de los 30 hertz, aproximadamente; las de la explosión, sin embargo, muestran energía hasta frecuencias de varios centenares de hertz. Así, los sismómetros sintonizados para detectar sólo ondas de alta frecuencia no "oirán" el terremoto; los sismómetros no se confundirán con el ruido constante de la tierra, sino que detectarán sin ambages las ondas generadas por detonaciones.

Dado que las ondas acústicas de alta frecuencia no recorren trayectos largos a través de la corteza terrestre, su detección obligaría a la instalación de sismómetros dentro del territorio de la Unión Soviética. Tan delicado problema político se ha solventado con el desarrollo de una estación sismológica autónoma. El personal de los laboratorios nacionales Sandia, de los Estados Unidos, ha diseñado y sometido a prueba cinco estaciones de esas, que funcionan ya en Canadá y los Estados Unidos para entrenamiento y usos demostrativos [*véase la figura 6*]. Las estaciones se comunican constantemente a través de una conexión mediatizada por satélite con una instalación de control ubicada en los Estados Unidos, lo que las hace prácticamente inviolables. Rusia aceptó una propuesta de emplazamiento de esas estaciones en su territorio en las negociaciones para un tratado de prohibición absoluta de pruebas, que interrumpieron los norteamericanos tras la invasión soviética de Afganistán. No parece, por tanto, que haya de presentarse ningún obstáculo técnico que impida el control, con gran fidelidad, de ensayos nucleares subterráneos que liberen un kilotón o menos de energía.



5. CAPACIDAD DE DISTINGUIR explosiones nucleares subterráneas de los temblores de tierra. Esa discriminación se ha afinado hasta el kilotón de potencia, e incluso menos, según muestra el gráfico, que se funda en un trabajo previo de Jack F. Evernden, del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Las curvas en negro representan los terremotos producidos; las continuas en color, explosiones nucleares en lecho rocoso blando; y las líneas a trazos, explosiones nucleares "activadas" en cavidades minadas.

Los tres tipos de medios técnicos estadounidenses para el seguimiento de las actividades soviéticas, descritos más arriba (generación de imágenes, detección de ondas electromagnéticas emitidas o reflejadas por los misiles durante los ensayos y escucha de ondas sísmicas), dan idea de la complejidad del potencial de seguimiento que poseen los Estados Unidos. El nivel de detalle con que Estados Unidos es capaz de detectar sugiere el tipo de cláusulas acordadas que Norteamérica puede y no puede someter a verificación. La cuestión no es menor: el principio que ha de guiar la aceptación de cualquier cláusula es el de que sea capaz de detectar las violaciones que pudieran amenazar su seguridad nacional. Que los norteamericanos puedan detectar esas violaciones dependerá de qué consideren amenazador para su integridad y de las características del sis-



6. ESTACION SISMICA AUTONOMA desarrollada por los laboratorios Sandia. Constituye, sin duda, un poderoso auxiliar en la verificación del cumplimiento de un tratado de prohibición total de armas nucleares. Hay ya en funcionamiento cinco estaciones de éstas en los Estados Unidos y Canadá.

tema de armamento o de la actividad militar limitada por el tratado.

Por ejemplo, en la hipótesis de que hubiera estaciones sísmicas norteamericanas autónomas instaladas en territorio soviético, ¿de qué limitaciones a las pruebas nucleares subterráneas pueden responder los detectores sísmicos su cumplimiento? Acabamos de exponer que, con esas estaciones, Estados Unidos detectaría explosiones nucleares de hasta un kilotón. ¿Faculta ello a aceptar un tratado de prohibición total de pruebas subterráneas, confiados en que cualquier violación por parte soviética que supusiera una amenaza se detectaría? Rusia podría intentar ensayos muy por debajo del nivel de detección norteamericano, realizando pruebas clandestinas de 100 toneladas, por ejemplo. Pero los soviéticos han acometido ya centenares de pruebas mucho más potentes; es más, un ensayo de 100 toneladas sería 1000 veces inferior a su menor arma nuclear estratégica, y 250.000 veces menor que las mayores. Probablemente no obtuvieran información útil de ensayos de esa magnitud, aunque se tratara de armas nuevas. Resulta poco verosímil, por tanto, que ningún ensayo de potencia inferior a la detectable por Estados Unidos pudiera atentar contra la seguridad. Antes bien, cualquier prueba susceptible de aportar información útil a los rusos la detectarían los estadounidenses. Así pues, la comparación entre lo que Norteamérica debe detectar con fiabilidad y lo que esa nación puede ya detectar con fiabilidad, en lo que atañe a pruebas subterráneas, lleva a la conclusión de que podría someter a verificación una prohibición absoluta con suficiente garantía para su integridad.

Lo mismo cabe afirmar con respecto a la capacidad norteamericana en el seguimiento de ensayos soviéticos de misiles. ¿Resulta adecuada esa capacidad para controlar un acuerdo que limitase las mejoras en la precisión de los ICBM? La determinación unilateral de la precisión a partir de la observación de ensayos de misiles balísticos es, según datos estadísticos, a lo sumo, algo incierto, de modo que las mejoras de precisión alcanzadas violando limitaciones resultarían de difícil control. Por el contrario, si los Estados Unidos consideran que es importante limitar la precisión soviética, queda otra opción: prohibir toda prueba de misiles. Se puede determinar ya con precisa exactitud las pruebas de misiles balísticos. De hecho, la probabilidad de que Estados Unidos detecte un único vuelo de prueba con certeza es superior al 90 por ciento, merced a los múltiples medios con que cuenta para descubrir maniobras. No menos de 20 vuelos de prueba se requieren para determinar fiablemente la precisión de un misil nuevo. Por tanto, si bien Estados Unidos

puede confiar en detectar el vuelo de prueba de un misil soviético únicamente el 90 por ciento de las veces, las posibilidades de que no detecte ninguno de los 20 ensayos rusos son sólo de uno entre 10^{20}. En resumen, un tratado que prohibiera todo tipo de ensayos de misiles balísticos es susceptible de someterse a verificación. Además, puesto que los Estados Unidos pueden discernir cuántos vehículos de reentrada transportan los misiles, otro tratado verificable sería el que limitase los vuelos de ensayo a misiles que lleven una sola cabeza nuclear.

En cuanto al seguimiento del desarrollo y despliegue de armamento estratégico soviético, no cabe duda de que los satélites de fotorreconocimiento estadounidenses pueden detectar y contar de manera fiable grandes sistemas de despliegue de armamento estratégico del tipo de ICBM, misiles balísticos a bordo de submarinos (SLBM), submarinos y bombarderos. La cuestión central es: ¿con qué precisión deben controlarse esos sistemas para mantener indemne la seguridad estadounidense, erosionada por las violaciones de los tratados que prohibieran o limitasen su fabricación o despliegue?

Resulta especialmente difícil guardar en secreto actividades que violen un tratado que prohíba un sistema de armamentos entero. Se descubren fácilmente los movimientos que conllevan el desarrollo, fabricación y despliegue de un número importante de cualquier arma. Cualquier intento por encubrir esas actividades se enfrentaría con un interrogante nada claro: la Unión Soviética no conoce exactamente hasta dónde llega la capacidad enemiga. Por tanto, no saben los rusos qué deben esconder, ni tampoco con qué ahínco deben intentar encubrir los detalles de cambios visibles que provocaría la fabricación clandestina de un arma.

La fiabilidad de la verificación del límite numérico de un sistema de armamento dependería de la cifra de armas permitida. Por regla general, resulta difícil confiar en la verificación de un acuerdo relativo a pequeñas cantidades de armas. La prohibición total de un sistema de misiles sería de más fácil verificación que el que aceptara 100 de esos misiles por bando. Si los soviéticos no pueden tener ninguno, en cuanto los sistemas de seguimiento estadounidenses detectaran uno quedaría de manifiesto que se han violado los acuerdos. Ahora bien, si se permitiera tener 100, ¿cómo averiguar si han fabricado 100 o 120? Los acuerdos sobre control de armamento que prohíben de plano un sistema de armas, unas maniobras o una actividad resultan mucho más sencillos de controlar y de verificar su cumplimiento que los que permiten un número reducido de armas.

Sin embargo, la Unión Soviética dispone de docenas de submarinos y bombarderos, unos 1000 SLBM y alrededor de 1400 ICBM. Se dice a menudo que los norteamericanos tienen capacidad para verificar esas cifras con una precisión del 10 por ciento o mejor (afirmación verosímil a la luz de los razonamientos anteriores sobre el potencial estadounidense en esa materia). Implica esa estimación que los Estados Unidos pueden controlar el cumplimiento exacto de los límites numéricos hasta unos cuantos submarinos o bombardero y quizás 100 SLBM o ICBM. Dada la magnitud del arsenal de que disponen ambas partes, esa precisión en la estima parece más que suficiente para mantener la seguridad de Estados Unidos con un tratado que limitara la producción de armas estratégicas.

Caso especial lo constituyen los misiles crucero: ingenios no tripulados de varios metros de longitud. El problema principal que plantean reside en que lo mismo portan una cabeza nuclear que otra convencional. Constituye una tarea extremadamente difícil, por tanto, distinguir los dotados de ojivas nucleares de los cargados con armamento convencional. Es probable que cualquier tratado de verificación que deba tener en cuenta los misiles crucero cubrirá el número total de misiles permitidos, sin hacer distinciones entre cabezas nucleares y convencionales.

Hemos pasado revista a diversas técnicas de detección remota y apenas nos hemos ocupado de las que afectan a las aplicaciones de verificación. (En realidad, no se ha descrito cómo podrían esas técnicas servir para habérselas con las armas antisatélite.) Es más, las capacidades reales de información de Estados Unidos son mucho mayores que las descritas aquí. Por un lado las técnicas de verificación superan, de lejos, el número de las que cabría razonablemente en este artículo y, por otro, más importante, la naturaleza de su procedimiento de recogida de información es tal que muchos de los métodos y fuentes por medio de los cuales los Estados Unidos recaban datos sobre la Unión Soviética constituye materia reservada. Sin embargo, nuestra exposición, necesariamente limitada, sugiere que la rica capacidad estadounidense de detección remota puede someter a verificación un amplio abanico de tratados.

Volcanes y nubes de Venus

Los mapas de radar de Venus y los análisis químicos de su atmósfera y corteza indican la existencia de volcanes activos. Los gases que desprenden forman una cubierta global de nubes de ácido sulfúrico

Ronald G. Prinn

Para el dedicado a la planetología, uno de los rasgos más intrigantes de la Tierra es su actividad geológica. El calor que fluye desde su interior impulsa procesos que modifican constantemente su superficie. La culminación de esta actividad es el vulcanismo: salida al exterior de gases y de rocas ardientes a través de grietas corticales. Se han observado también erupciones volcánicas en Io, satélite de Júpiter, pero en ningún otro cuerpo más del Sistema Solar. Pese a ello, Venus, nuestro allegado vecino planetario, se parece a la Tierra en muchos aspectos. Dotado aproximadamente del mismo tamaño y masa, se formó en la misma región de la nebulosa solar en condensación. Cabría esperar, por tanto, que los dos planetas hubieran experimentado una evolución similar. ¿Hay, pues, volcanes activos en Venus?

Durante muchos años, las respuestas debieron moverse en el terreno de la mera especulación, porque una capa de nubes, espesa y permanente, frustraba todos los esfuerzos por investigar la superficie venusiana. La situación cambió en el último lustro. Las nubes siguen allí impidiendo el paso de la luz visible, aunque transparentes a las radioondas y a las microondas. Gracias a ellas se ha cartografiado de forma muy completa la superficie, con un instrumento de radar a bordo del *Pioneer Venus*, que ha estado en órbita alrededor del planeta desde 1978. Los mapas, junto con imágenes de radar de alta resolución más recientes obtenidas por dos vehículos espaciales soviéticos y por radiotelescopios en la Tierra, han revelado estructuras de tipo volcánico.

La misma persistencia de las nubes opacas constituye, además, un dato valioso de actividad volcánica, aunque indirecto. Ocupando altitudes entre 50 y 70 kilómetros, las nubes están formadas por ácido sulfúrico concentrado y una materia absorbente en el ultravioleta, probablemente azufre elemental. A lo largo de los últimos años varias sondas de descenso han sobrevivido al ataque corrosivo de esas sustancias y al intenso calor que reina en la superficie (460 grados Celsius) hasta medir la composición de la atmósfera y la corteza del planeta. Merced a ello, nos es ahora posible descifrar la interacción entre ambas y desentrañar el complicado ciclo de reacciones fotoquímicas y termoquímicas que transforman los gases sulfurosos en partículas de nube. Los datos indican que los gases sulfurosos se inyectan continuamente en la atmósfera a través de un mecanismo que podría ser volcánico. De hecho, la detección de cambios espectaculares en la abundancia de dióxido de azufre en la atmósfera, por encima de las cimas de las nubes, que ha realizado el vehículo orbital *Pioneer Venus*, sugiere que el planeta se vio sacudido por gigantescas erupciones a lo largo de los últimos diez años.

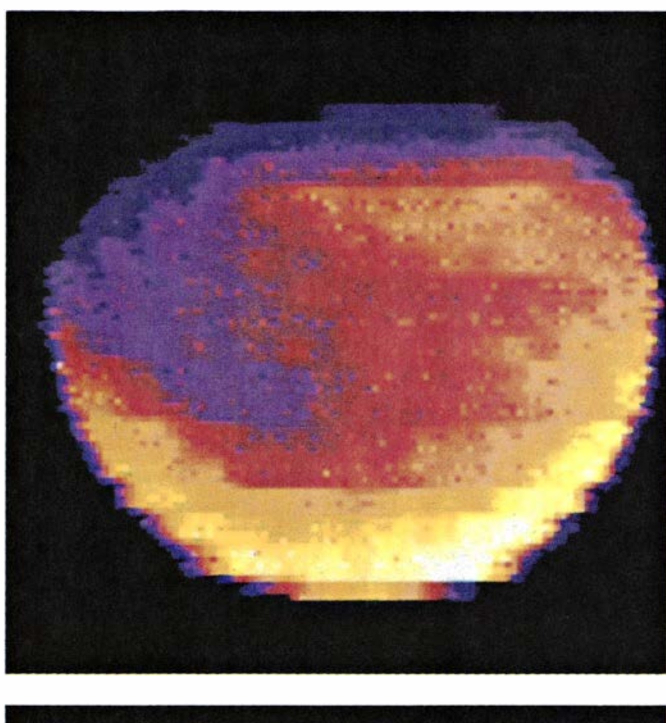
Las primeras manifestaciones de la existencia de volcanes en Venus, activos o extintos, las ofrecen los trabajos con radar. A principios de los años sesenta, se apuntaron hacia Venus los radiotelescopios de Arecibo, en Puerto Rico, y de Goldstone, en California. Proporcionaron el cálculo fidedigno de su radio (6052 kilómetros, frente a los 6378 de la Tierra) y de su período de rotación (243 días), así como las primeras imágenes de accidentes importantes de su superficie, tales como el enorme continente septentrional de Ishtar Terra. En 1977, R. Stephen Saunders y Michael C. Malin, del Laboratorio de Propulsión a Chorro, sugirieron que el Monte Theia, en la región conocida como Beta Regio, sería un gran volcán de escudo: una estructura de tosca simetría, formada por erupciones crónicas y no explosivas de lava ardiente que se mueve a lo largo de grandes distancias antes de solidificarse. Con 700 kilómetros de diámetro, el Monte Theia es mucho mayor que los volcanes hawaianos de escudo, pero menor que el Monte Olimpo en Marte, que parece ser un ejemplo gigante de esta clase de elevación.

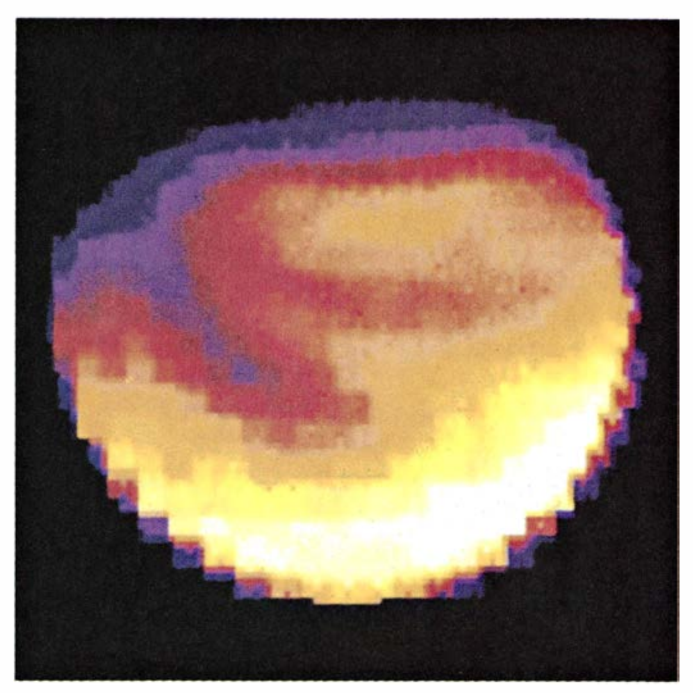
Cuando el *Pioneer Venus* entró en órbita venusiana, en diciembre de 1978, se hizo posible generar imágenes de radar de alta resolución espacial y cartografiar el relieve superficial del planeta. Basándose en esos datos, Harold Masursky, de la Inspección Geológica de los Estados Unidos, Gordon H. Pettengill y sus colegas, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, supusieron, en 1980, que la totalidad de Beta Regio, incluidos los montes Theia y Rhea (ambos de altura superior a 4,5 kilómetros), constituía una enorme estructura volcánica formada por la lenta acumulación de lava. Más tarde, George E. McGill y sus colegas, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, abogaron por otra topología: los volcanes vendrían a ser estructuras de lava más modestas, encima de una cúpula alargada de corteza elevada.

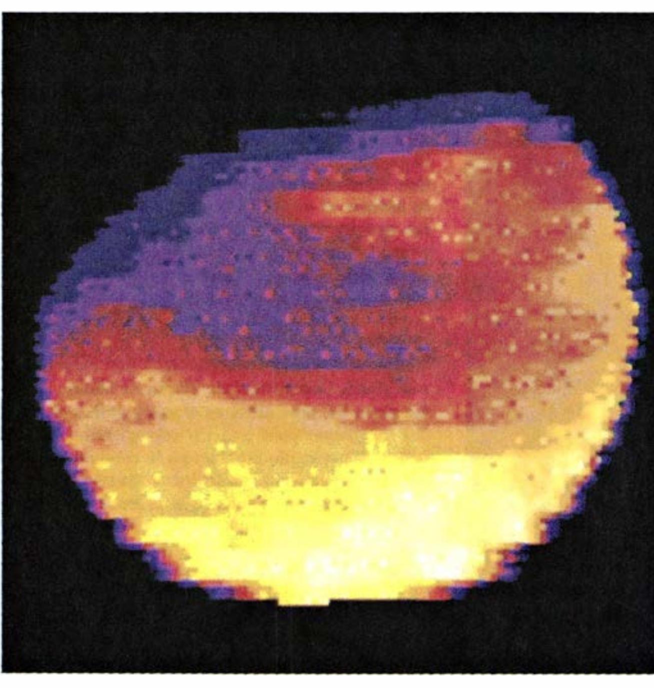
Las últimas teorías hablan de un afloramiento regional de magma, no localizado, bajo Beta Regio. Se basan en la observación de perturbaciones en la órbita del *Pioneer Venus* que confirman que la gravedad en la región supera el valor promedio en Venus. El afloramiento puede alcanzar potencia suficiente para provocar algún movimiento horizontal de la corteza. En 1983, Donald B. Campbell y sus colaboradores en el Observatorio de Arecibo tomaron una imagen de Beta Regio con una resolución unas 10 veces superior a la que el *Pioneer Venus* puede alcanzar; la imagen muestra una importante grieta lineal que atraviesa la región flanqueada por estructuras volcánicas. En todo caso, hay acuerdo general en que Beta Regio ha conocido actividad volcánica.

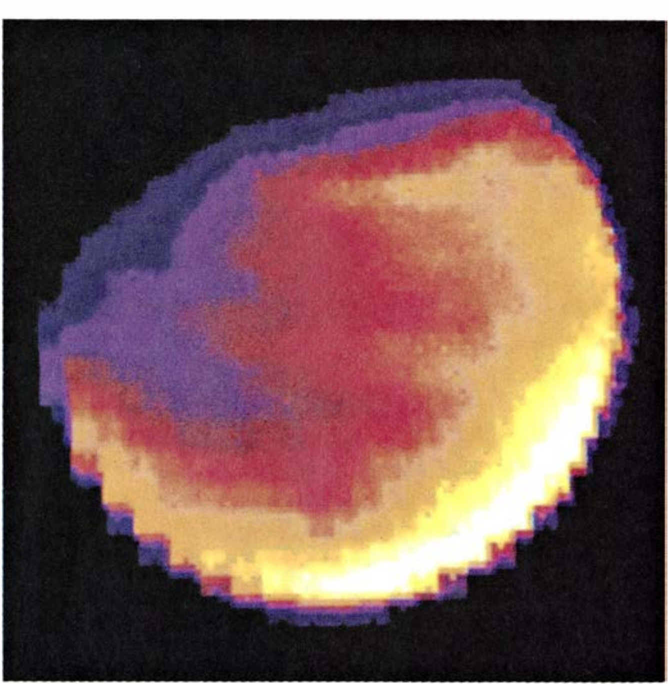
El brillo de las imágenes de radar sugiere que ésta pudo haber sido geológicamente reciente: el brillo denuncia superficies abruptas, superficies relativamente jóvenes que no han sufrido las inclemencias del tiempo.

Beta Regio no es la única región donde se han observado estructuras volcánicas. Hay picos y pináculos aislados, detectados por el *Pioneer Venus*, en Atla Regio, al oeste de Beta y cerca del ecuador, que pueden corresponder a distintos volcanes, según James W. Head, de la Universidad Brown, y otros investigadores. Los vehículos espaciales soviéticos *Venera 15* y *Venera 16*, que han estado en órbita alrededor de Venus desde octubre de 1983, han transmitido imágenes de grandes accidentes circulares, hasta entonces ignorados. De varios cientos de kilómetros de diámetro y altura relativamente pequeña, marcan la superficie de Ishtar Terra y otras regiones. En opinión de A. T. Basilevsky, V. L. Barsukov y sus colaboradores, del Instituto moscovita de Geoquímica y Química Analítica V.I. Vernadsky, esos accidentes serían enormes cúpulas volcánicas hundidas, que dejaron pliegues de corteza alrede-





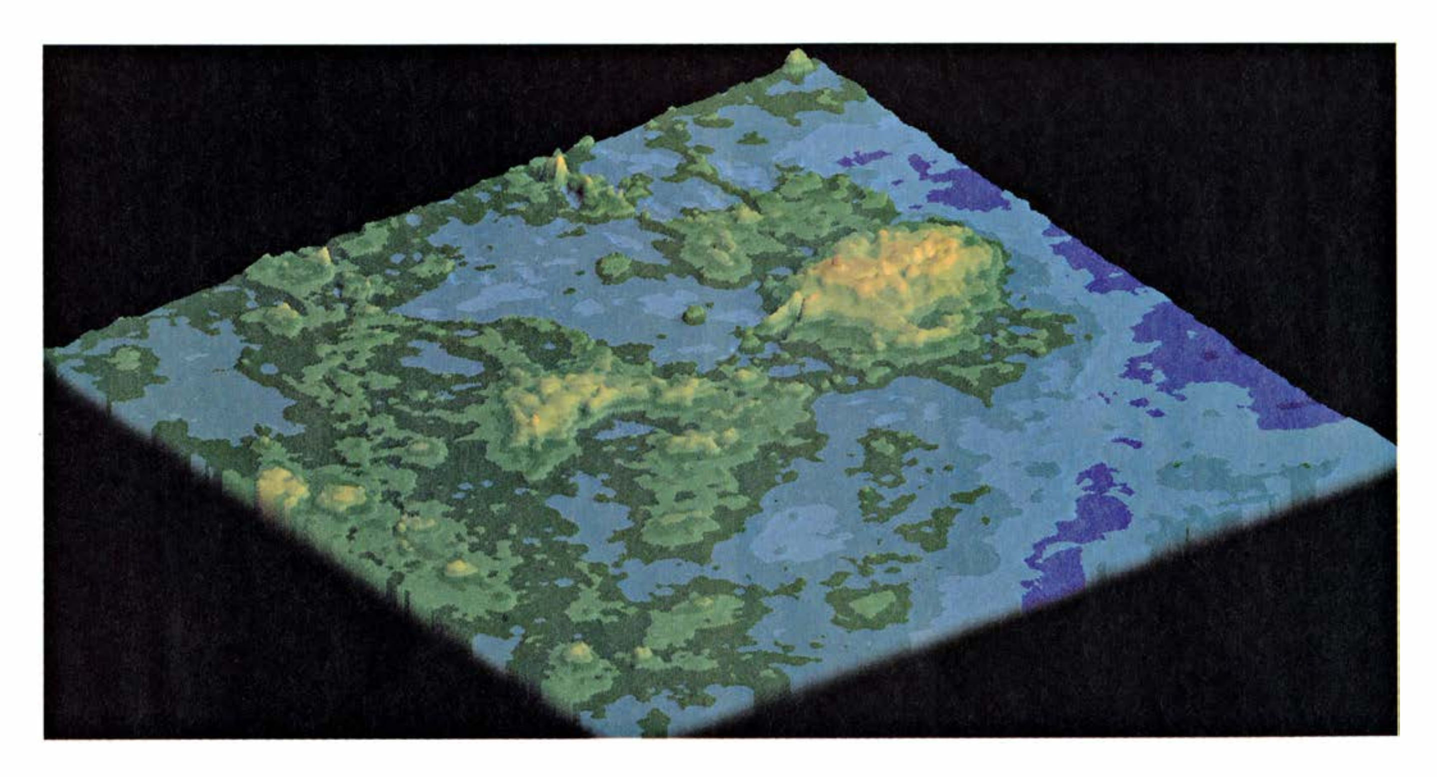


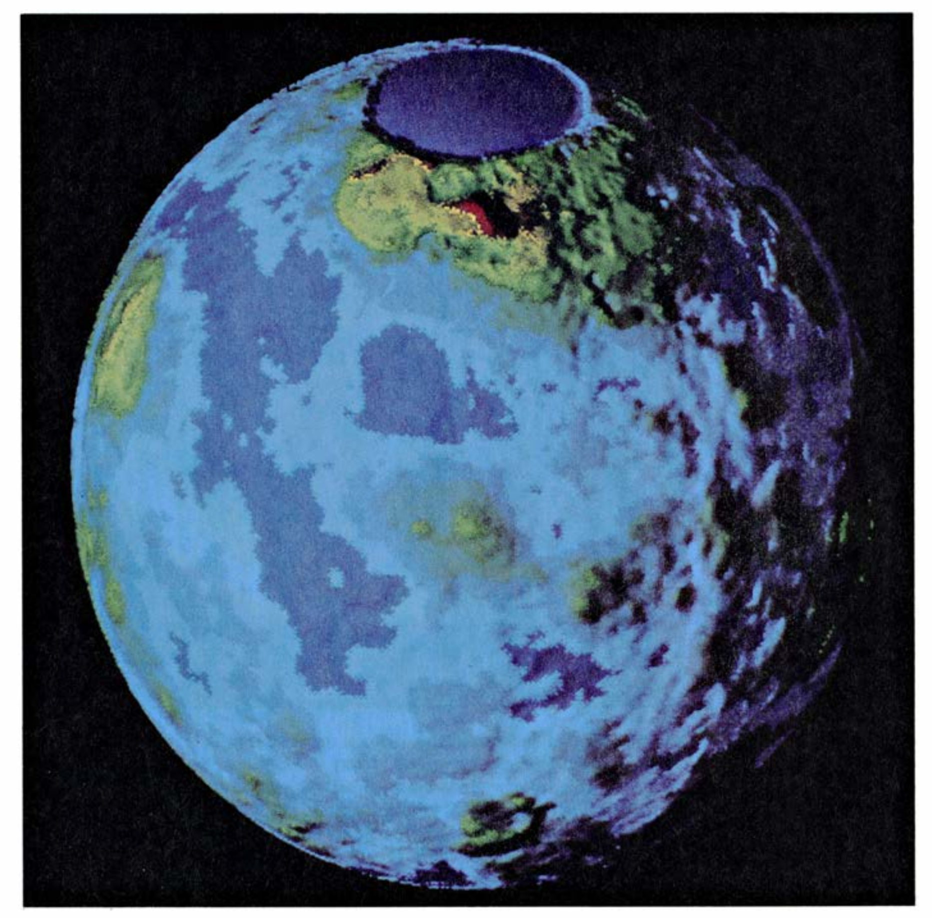


1. DIOXIDO DE AZUFRE en las cimas de las nubes de Venus: corresponde a las bandas de azules basadas en medidas del espectrómetro ultravioleta a bordo del *Pioneer Venus*. Las imágenes representan la radiación a una longitud de onda de 207 nanómetros, que el dióxido de azufre absorbe fuertemente y las nubes reflejan. Los datos fueron recogidos a lo largo de un período de cinco días, en agosto de 1984, durante el cual la atmósfera del planeta, que gira mucho más deprisa que la superficie, completó una rotación entera con respecto al vehículo espacial. La primera imagen (*arriba, a la izquierda*) y la última (*abajo, a la derecha*) muestran la misma parte de la atmósfera. A partir de imágenes semejantes a éstas, Larry W. Esposito, de Boulder, ha determinado que la proporción media de dióxido de azufre por encima de las nubes ha disminuido en más del 90 por ciento desde que el vehículo espacial entró en órbita venusiana, a finales de 1978. En esa época, la abundancia era inesperadamente alta. El panorama sugiere que una enorme erupción volcánica inyectó dióxido de azufre en la atmósfera superior antes de que el vehículo orbital llegase; desde entonces, el gas ha estado formando ácido sulfúrico (H_2SO_4).

dor de su periferia. (De acuerdo con una explicación no volcánica de los accidentes circulares, se trataría de antiguos cráteres de meteoritos, erosionados por la acción del tiempo.)

Los radares instalados a bordo de los vehículos orbitales Venera proporcionan imágenes con una resolución horizontal de uno a dos kilómetros, mientras que la resolución del instrumento del *Pioneer Venus* es, en el mejor de los casos, de treinta kilómetros. Desgraciadamente, las misiones soviéticas se proyectaron para obtener imágenes de un tercio del planeta; su cobertura ha excluido la mayor parte de Beta Regio. El próximo avance importante en nuestro conocimiento de las estructuras superficiales procederá, probablemente, del *Venus Radar Mapper* (cartógrafo radárico de Venus), que la Administra-





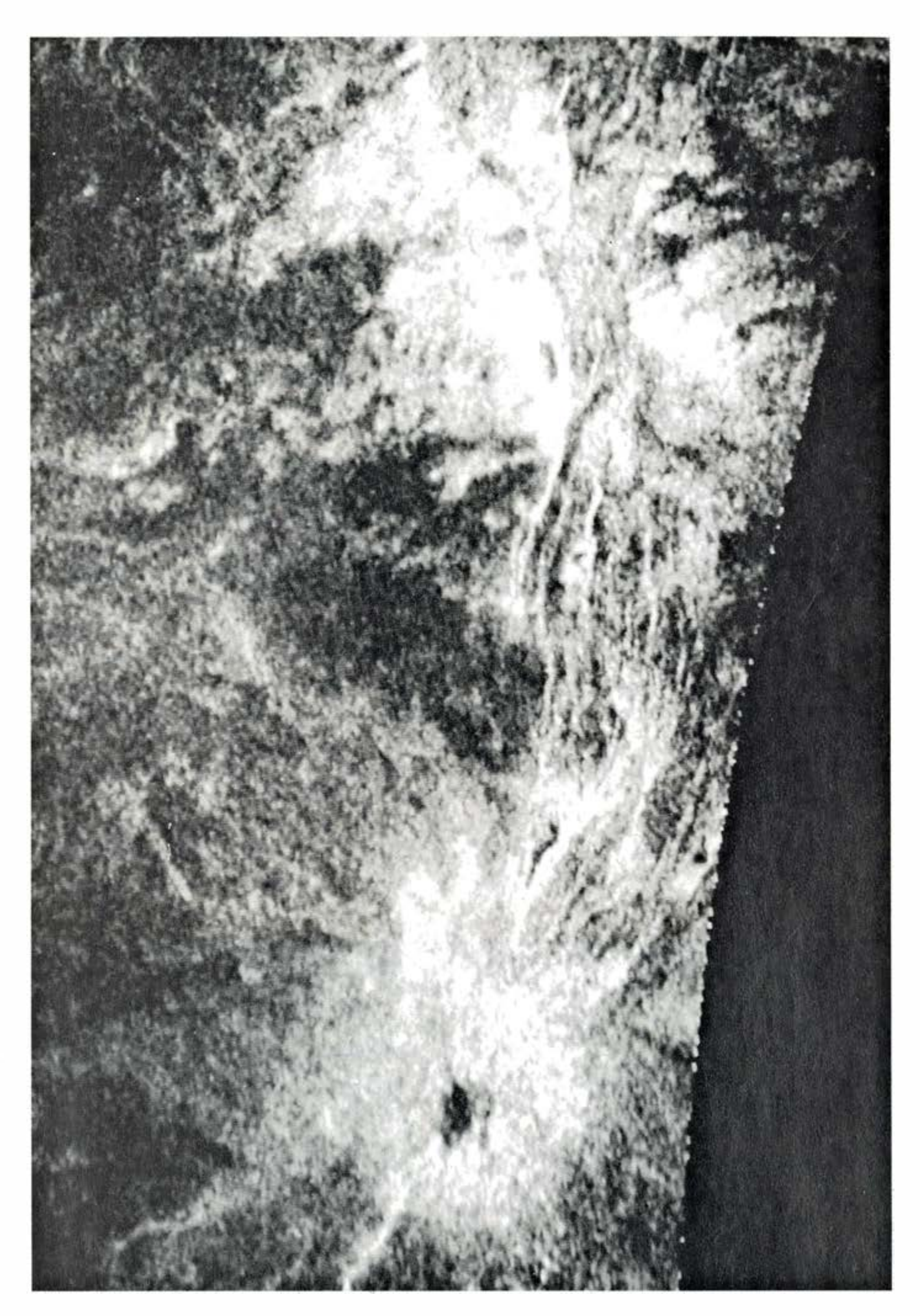
2. TOPOGRAFIA DE VENUS, cartografiada con un radar altimétrico, colocado a bordo del vehículo orbital *Pioneer Venus*. Conforme el vehículo describe órbitas alrededor del planeta, el altímetro mide la distancia hasta la superficie; restando la distancia hasta el centro de masa del planeta, conocida mediante un seguimiento preciso de la órbita, se obtiene el radio del planeta en cada punto. En los mapas, las alturas mayores son amarillas y rojas; las menores, azul marino. La mayor parte de la superficie de Venus es notablemente llana. Mientras que el 35 por ciento de la superficie de la Tierra es continental y el 65 por ciento es fondo oceánico, Venus tiene sólo dos accidentes de tipo continental que ocupan sólo el 5 por ciento de la superficie. Uno de ellos, la Tierra de Ishtar, es visible cerca del polo norte en el mapa global (*izquierda*) (el propio polo está sin cartografiar, pues la órbita del vehículo espacial no lo conduce sobre el polo). La región roja en Ishtar es Maxwell, la montaña más alta de Venus, que alcanza más de 11 kilómetros sobre el nivel medio; recuerda el monte Everest. Maxwell podría ser de origen volcánico, aunque quizás haya cesado su actividad. La zona verde amarillenta, al suroeste de Ishtar, en el borde izquierdo del globo, es Beta Regio, donde probablemente persiste la actividad volcánica. En la vista ampliada en perspectiva (*arriba*), es la ancha región de tierras altas con un grupo de pináculos. Los dos picos más altos de Beta, los montes Theia y Rhea, tienen más de 4,5 kilómetros de altura. Al sur de Beta (*a la izquierda de la ilustración*) se encuentra Phoebe Regio, que tiene también estructuras de tipo volcánico. La vista ampliada fue obtenida por el Servicio de Inspección Geológica de los Estados Unidos; la imagen global se confeccionó en el Laboratorio de Propulsión a Chorro.

ción Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) proyecta lanzar en 1988, y que cubrirá la totalidad del planeta con una resolución de 0,2 kilómetros.

¿Es activa alguna de las estructuras volcánicas descubiertas hasta ahora? La pregunta no se puede contestar sólo con imágenes de radar. Responderla sin observar directamente las erupciones requiere conocimientos de la composición de la corteza y atmósfera de Venus.

La primera información, desconcertante, sobre la química de la corteza provino, en 1975, de los *Venera 8, 9* y *10*, que se posaron sobre el suelo. Equipados con detectores de rayos gamma, estas sondas midieron la abundancia de potasio, uranio y torio radiactivos en la corteza. Aunque variaba la concentración de un punto de aterrizaje a otro, los elementos radiactivos que había en Venus se presentaban en cantidades comparables con los niveles que se encuentran en las rocas continentales de la superficie terrestre. Habida cuenta de que la desintegración radiactiva constituye la principal fuente del calor interno de la Tierra, los datos proporcionados por los Venera sugieren que la cantidad de calor generada en el interior de Venus recuerda, de cerca, la que se genera en el planeta que habitamos.

El calor de la desintegración radiactiva tiene que escapar del interior del planeta. Pero, ¿cómo? El camino más eficaz es alguna forma de vulcanismo que, en su sentido lato, designa cualquier clase de flujo convectivo de materia caliente hacia la superficie. En la Tierra, bastante más de la mitad de la pérdida de calor se produce en las crestas oceánicas; allí, las placas que constituyen la litosfera (la capa exterior y rígida del planeta) divergen; la lava fluye desde la astenosfera fluida para generar nueva corteza. Una segunda forma de vulcanismo la encontramos en los arcos volcánicos de islas, asociados a fosas oceánicas, lugar de colisión de dos placas que obliga a una de ellas a subducir o hundirse hasta la astenosfera. Sin embargo, como han señalado Raymond E. Arvidson, de la Universidad Washington, y otros investigadores, los mapas radáricos de Venus no revelan ninguna red general de crestas y fosas. Puede suceder, según declara Don L. Anderson, del Instituto de Tecnología de California, que la litosfera de Venus sea más delgada que la de la Tierra, amén de más caliente y menos densa, y que tenga, entonces, demasiado empuje ascensional para ser forzada hacia el interior fluido del planeta.



3. IMAGEN DE RADAR DE BETA REGIO que sugiere que los montes Theia y Rhea son volcanes de escudo que flanquean una fosa lineal en la corteza. Obtenida a la longitud de onda de 12,6 centímetros, con el radiotelescopio de 300 metros del Observatorio de Arecibo, la imagen atestigua la rugosidad variable de la superficie: las zonas brillantes son bastante ásperas y accidentadas; las oscuras, relativamente lisas. Theia es el accidente circular de la parte inferior de la imagen; su brillo se atribuye a corrientes de lava de formación reciente. Se cree que las configuraciones lineales que se dirigen hacia el norte, hacia Rhea, constituyen una fosa; idea que se apoya en parte en que corren paralelas a un cañón descubierto en estudios topográficos. El conjunto sugiere que un abombamiento regional ha levantado la corteza en Beta, produciendo la fosa y los volcanes. La imagen tiene una resolución horizontal de unos dos kilómetros.

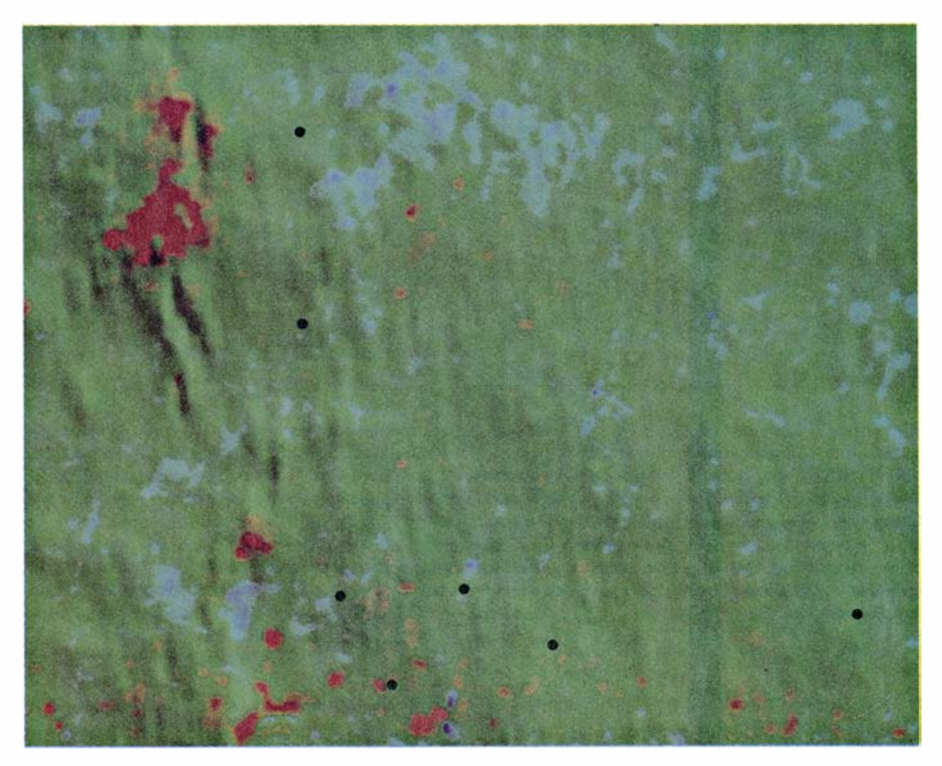
Ante la carencia de indicios claros de tectónica de placas, William M. Kaula y Lynn M. Muradian, de la Universidad de California en Los Angeles, se inclinan por dos mecanismos posibles de pérdida de calor en Venus: la erupción de volcanes aislados en "puntos calientes", como los de Hawai, que no están asociados a los límites de una placa, y la transmisión de calor por conducción en delgadas regiones cupuliformes, donde la corteza se ha elevado. La estructura en forma de pináculos, cúpulas y crestas de Beta Regio sugiere que se han dado allí ambos tipos de pérdida de calor. No parece probable que la conducción, proceso muy lento en las rocas, sea el único modo de enfriamien-

to. La necesidad de un mecanismo adecuado de enfriamiento constituye un poderoso argumento a favor del vulcanismo activo en Venus, pero no es concluyente.

El vulcanismo tiene otra función: aliviar de gases el interior del planeta. Los gases desprendidos por los volcanes terrestres contienen dióxido de carbono, nitrógeno, vapor de agua, gases sulfurosos e isótopos de gases nobles (argón 40 y helio 4), que son productos de desintegración radiactiva. Todos esos gases se han detectado en la atmósfera de Venus mediante los módulos de entrada *Pioneer Venus* y *Venera 11, 12, 13* y *14*.

Se cree que, tanto en Venus como en la Tierra, el desprendimiento de gases del interior del planeta en el principio de su historia constituyó la fuente primaria de sus atmósferas. Pero se trata de dos atmósferas notoriamente diferentes: la de Venus es de dióxido de carbono en un 96 por ciento, mientras que el 78 por ciento de la terrestre es nitrógeno. La diferencia arranca, hasta cierto punto, de la presencia de océanos en la Tierra, que han absorbido la mayor parte del dióxido de carbono de la atmósfera y lo han almacenado en la corteza en forma de carbonatos. Si en Venus hubo alguna vez océanos, hace mucho tiempo que se evaporaron y que el hidrógeno escapó al espacio.

Al comparar las dos atmósferas, los carbonatos de la corteza terrestre deben incluirse, por tanto, en su inventario de dióxido de carbono; el hecho de que la atmósfera de Venus tenga una masa 90 veces mayor debe tomarse también en consideración. La cantidad total de dióxido de carbono y de nitrógeno en Venus resulta ser un 30 por ciento inferior a la que encierra la Tierra. La concentración de argón 40 viene a ser de un tercio del valor terrestre, mientras que la abundancia en la corteza de su fuente, el potasio 40 radiactivo, es aproximadamente la misma en Venus que en la Tierra. Estos hechos sugieren que los dos planetas han experimentado, como mínimo, desprendimientos gaseosos parejos y, en consecuencia, niveles de vulcanismo parangonables, a lo largo de su respectivo curso histórico. Sin embargo, la presencia de dióxido de carbono, nitrógeno y argón 40 no demuestra que se hayan desprendido recientemente; esos gases son bastante estables y sobreviven en la atmósfera durante períodos geológicos. Para obtener pruebas más firmes de actividad volcánica reciente, hay que examinar las nubes y los gases de azufre que las producen.



4. REFLECTIVIDAD de la superficie de Venus a las radioondas de 17 centímetros; al variar considerablemente con la posición, se pone de manifiesto que la composición de la superficie varía también. El mapa se extiende entre las latitudes 40 grados Norte y 20 grados Sur, y entre las longitudes 270 y 340 grados Este. El rojo indica la reflectividad más alta; el azul, la más baja. La zona roja de la parte superior izquierda constituye la porción central de Beta Regio; el monte Theia tiene una de las reflectividades más altas observadas hasta ahora. Según una explicación probable, la superficie estaría formada por rocas volcánicas, con inclusiones abundantes de pirita, mineral conductor que contiene azufre. Por desgracia, ninguna de las regiones donde se posaron los Venera (*puntos negros*) tenía alta reflectividad. El mapa fue preparado por Peter G. Ford y Gordon H. Pettengill, del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Ni siquiera en Venus el azufre es un componente atmosférico importante: los progenitores gaseosos de las nubes constituyen el 0,02 por ciento y, las propias partículas de las nubes, un escaso 0,00002 por ciento de la atmósfera. Pese a ello, las nubes ejercen un notable efecto sobre el clima del planeta. Reflejan casi cuatro quintas partes de la radiación solar incidente, particularmente en las longitudes de onda del amarillo y rojo. En consecuencia, Venus absorbe mucha menos energía solar que la Tierra, pese a estar más cerca del Sol. De la energía no devuelta al espacio, dos tercios se quedan en las nubes, que son absorbentes en las longitudes de onda del ultravioleta y del infrarrojo próximo; sólo una tercera parte alcanza la baja atmósfera y la superficie. (Sin nubes, la tempeatura superficial se elevaría mucho más.) En la Tierra sucede lo contrario: dos terceras partes de la radiación solar incidente se absorben en la superficie.

El componente dominante de las nubes es ácido sulfúrico concentrado: 75 por ciento en masa. Las pruebas que lo corroboran, aunque indirectas, resultan convincentes. El espectro de reflexión de las partículas de las nubes en el visible e infrarrojo se acerca al del ácido sulfúrico. Los estudios de la polarización de la luz solar reflejada por las nubes indican que las partículas son esféricas, lo que implica que se trata de gotas líquidas, con un índice de refracción de 1,44. Estos resultados excluyen a la mayor parte de los candidatos, salvo el ácido sulfúrico. En particular, excluyen el agua, cuyo índice de refracción se cifra en 1,33 y se torna vapor a las temperaturas dominantes en la parte inferior de las nubes. Además, las concentraciones de dióxido de azufre y de vapor de agua que hay en las nubes decrecen rápidamente con la altura, lo que sugiere que ambas sustancias están sometidas a reacciones químicas que, en último término, producen ácido sulfúrico (H_2SO_4).

El ácido sulfúrico es un componente común de la atmósfera terrestre. Está presente en forma diluida en la lluvia ácida; aparece también en forma concentrada (como en Venus) en una capa muy delgada de nubes estratosféricas. El ácido se produce a partir de los siguientes compuestos: dióxido de azu-

fre, sulfuro de hidrógeno (H_2S), sulfuro de dimetilo ($(CH_3)_2S$) y sulfuro de carbonilo (OCS). La fuente primaria de dióxido de azufre es la quema de combustibles fósiles, mientras que los tres gases reducidos son, principalmente, sólo productos metabólicos de diversas bacterias. Pero el dióxido de azufre y dos de los gases reducidos (el sulfuro de hidrógeno y el sulfuro de carbonilo) fluyen también, como una sustancia más, de los volcanes terrestres, con el cloruro y el fluoruro de hidrógeno.

Todos estos efluentes volcánicos se han detectado en la atmósfera de Venus. Dada su alta reactividad, con su consiguiente vida corta, y no haber, a lo que parece, vida en Venus, podría pensarse que su presencia allí fuera, por sí sola, prueba de actividad volcánica hoy. Pero a finales de los años sesenta John S. Lewis, actualmente en la Universidad de Arizona, sugirió que esos gases los expulsaban las rocas superficiales en razón del intenso calor. Los gases se incorporan a la atmósfera, según Lewis, a la misma velocidad con la que se extraen de ella por reacciones con la superficie, de modo que no hay flujo neto de un componente dado hacia o desde la atmósfera. En otras palabras, los gases sulfurosos, el cloruro de hidrógeno y el fluoruro de hidrógeno de la atmósfera están en equilibrio químico con los minerales de la corteza.

De acuerdo con el modelo de Lewis, la proporción de mezcla, o concentración atmosférica, del oxígeno molecular está determinada por una reacción reversible de equilibrio. En este proceso, el óxido de hierro en forma mineral (FeO) y el mineral anhidrita, sulfato de calcio ($CaSO_4$), reaccionan con el dióxido de carbono para producir el mineral calcita, carbonato de calcio ($CaCO_3$), el mineral pirita, sulfuro de hierro (FeS_2) y oxígeno. La proporción de mezcla del oxígeno predicha, extremadamente pequeña, determina el estado de oxidación de los gases sulfurosos. Como resultado, el gas sulfuroso dominante se reduciría a sulfuro de carbonilo, con una concentración de unas 600 partes por millón (p.p.m.). El sulfuro de hidrógeno, también un compuesto reducido, tendría una proporción de mezcla de unas 130 p.p.m.; la del dióxido de azufre sería sólo de 16 p.p.m.

Desde que Lewis propuso su modelo de equilibrio, nuevos datos, en cuya interpretación participó el autor, han

ELEMENTO	VENERA 13	VENERA 14
MAGNESIO (MgO)	11.4 ± 6.2	8.1 ± 3.3
ALUMINIO (Al_2O_3)	15.8 ± 3.0	17.9 ± 2.6
SILICIO (SiO_2)	45.1 ± 3.0	48.7 ± 3.6
POTASIO (K_2O)	4.0 ± 0.6	0.2 ± 0.1
CALCIO (CaO)	7.1 ± 1.0	10.3 ± 1.2
TITANIO (TiO_2)	1.6 ± 0.5	1.3 ± 0.4
MANGANESO (MnO)	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1
HIERRO (FeO)	9.3 ± 2.2	8.8 ± 1.8
AZUFRE (SO_3)	1.6 ± 1.0	0.9 ± 0.8
OTROS	3.9	3.6

5. COMPOSICION DE LA SUPERFICIE de Venus, determinada en dos puntos por instrumentos de fluorescencia de rayos X instalados a bordo de los *Venera 13* y *Venera 14*. Para calcular la importancia relativa de los elementos (en porcentajes del peso total) se supuso que cada elemento estaba presente en forma de óxido. Las concentraciones son parecidas a las que se encuentran en ciertos basaltos volcánicos de la Tierra, excepción hecha del azufre, más abundante en Venus. El azufre abunda en Venus mucho menos que el calcio, lo que indica que la mayor parte del calcio está en forma de óxido, en silicatos o carbonatos, y no de sulfatos. El óxido de calcio debe estar extrayendo dióxido de azufre de la atmósfera; los dos reaccionan espontáneamente cuando el nivel de dióxido de azufre está por encima del equilibrio.

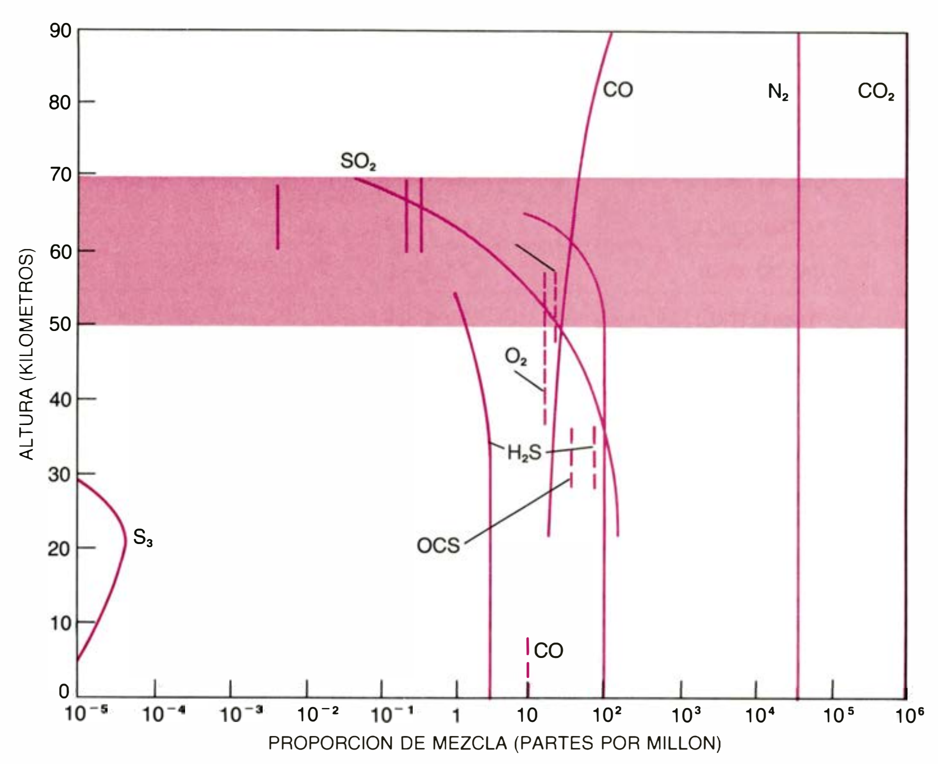
mostrado que las predicciones del modelo estaban equivocadas, al menos en lo que se refiere a los gases sulfurosos. La proporción de mezcla del dióxido de azufre se ha medido, y es de 150 p.p.m., casi diez veces su valor de equilibrio. Las medidas más recientes, obtenidas en 1982 por los cromatógrafos de gases a bordo de los *Venera 13* y *Venera 14*, colocan la abundancia total de sulfuros de carbonilo y de hidrógeno en 150 p.p.m., muy por debajo de su total de equilibrio, cifrada en 730 p.p.m. Las anteriores sondas *Venera 11, Venera 12* y *Pioneer Venus* hallaron niveles de sulfuro de carbonilo y de sulfuro de hidrógeno todavía más bajos y, con ello, una mayor importancia relativa del dióxido de azufre.

El modelo de equilibrio no puede dar cuenta de los altos niveles de dióxido de azufre. Sabemos ya que las proporciones de gases sulfurosos en la atmósfera de Venus no vienen determinadas por reacciones reversibles con la corteza que se desarrolla con la misma velocidad en ambas direcciones. Más bien al contrario, el azufre se introduce en la atmósfera mediante una reacción, experimenta una sucesión de transformaciones para formar ácido sulfúrico y se elimina de la atmósfera, eones más tarde, por una reacción diferente con la corteza.

El ciclo del azufre en Venus representa un equilibrio entre dos regímenes químicos opuestos: uno fotoquímico y otro termoquímico. Las reacciones fotoquímicas aumentan el estado de oxidación del azufre y producen las nubes de ácido sulfúrico. De la descomposición del dióxido de carbono en monóxido de carbono y oxígeno, por acción de la luz ultravioleta que hay dentro y por encima de las nubes, procede el oxígeno. Cerca de la superficie, las altas temperaturas y densidades impulsan reacciones termoquímicas que dan por resultado una reducción (desoxidación) neta del azufre. Estas reacciones regeneran el precursor gaseoso de las nubes.

El ciclo se puede dividir en tres partes: dos subciclos atmosféricos, "rápido" y "lento", y un subciclo geológico. El subciclo rápido se inicia en la atmósfera media y alta (por encima de la base de las nubes, a 50 kilómetros) con la oxidación, bajo la influencia de la luz ultravioleta, de dióxido de azufre en ácido sulfúrico. Las reacciones de oxidación se catalizan mediante los compuestos de cloro e hidrógeno que resultan de la fotodisociación del cloruro de hidrógeno. El ácido sulfúrico cae luego hacia la atmósfera, caliente, situada bajo las nubes y se evapora. El trióxido de azufre resultante reacciona termoquímicamente con el monóxido de carbono para generar dióxido de carbono y dióxido de azufre. Una molécula de azufre completa el circuito del subciclo rápido en un año, aproximadamente.

En el interior y por encima de la re-



6. COMPOSICION ATMOSFERICA de Venus analizada con los telescopios instalados en la Tierra y a través de varias sondas que penetraron en la atmósfera, las más recientes de las cuales fueron *Venera 13* y *Venera 14* (*líneas de trazos*). Las proporciones de mezcla, o concentraciones, de algunos compuestos importantes aparecen en función de la altura en una escala logarítmica; por ejemplo, el dióxido de carbono (CO_2), que constituye el 96 por ciento de la atmósfera, decuplica la cantidad de nitrógeno (N_2) y multiplica unas 10.000 veces la del dióxido de azufre (SO_2), cuya proporción de mezcla es de unas 150 partes por millón. El final de las líneas indica falta de medidas más allá de un intervalo de alturas particular, pero no la ausencia de dichos compuestos. Las recientes misiones Venera hallaron niveles más altos de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y de sulfuro de carbonilo (OCS) que los detectados hasta entonces. Los valores del hidrógeno (H_2) y del oxígeno (O_2) son límites superiores; estos compuestos no se han detectado. El dióxido de azufre y el vapor de agua muestran disminuciones paralelas de concentración en la región de las nubes, lo que indica que están reaccionando para formar partículas nubosas de ácido sulfúrico. La atmósfera de Venus contiene cantidades detectables de ácidos clorhídrico (HCl) y fluorhídrico (HF).

gión de las nubes, se forman ácido sulfúrico y azufre elemental mediante la oxidación fotoquímica del sulfuro de carbonilo y del sulfuro de hidrógeno en el subciclo lento; en la baja atmósfera, los dos gases sulfurosos se oxidan a azufre y, tal vez, a dióxido de azufre, bajo la influencia de la luz casi ultravioleta que transmiten las nubes. La formación de azufre elemental constituye un rasgo característico del subciclo lento a destacar: da cuenta de la absorción por parte de las nubes de radiación en el dominio ultravioleta. El ácido sulfúrico, el dióxido de azufre y el azufre elemental acaban reducidos por el hidrógeno molecular y el monóxido de carbono, para volver a formar sulfuro de hidrógeno y sulfuro de carbonilo en la baja atmósfera, caliente. El subciclo lento tarda probablemente una década en completarse, puesto que el azufre queda aprisionado en el subciclo rápido, durante algunos años, antes de reducirse.

La proporción de mezcla total de los compuestos de azufre (y con ello el espesor de las nubes de ácido sulfúrico) viene determinada por la interacción entre la atmósfera y la corteza en el subciclo geológico. Disponemos ya de información suficiente para desentrañar esa interacción. Los datos nuevos más importantes provienen de los instrumentos de fluorescencia de rayos X a bordo de los módulos de descenso *Venera 13* y *Venera 14*. Empleando estos datos, Yu. A. Surkov, y sus colaboradores del Instituto Vernadsky, determinaron recientemente la composición elemental de la corteza. (Cuando un elemento se expone a los rayos X de tal instrumento, emite una fluorescencia en el dominio de los rayos X con un espectro característico.) Las rocas de la superficie venusiana contienen una cantidad relativamente grande de azufre; pero, por lo demás, sus proporciones de elementos son semejantes a las que se hallan en ciertos basaltos terrestres, rocas éstas de naturaleza volcánica.

El subciclo geológico comienza con la producción de gases sulfurosos, en particular sulfuro de carbonilo y sulfuro de hidrógeno, mediante reacciones termoquímicas de mineral de pirita, que contiene azufre, con dióxido de carbono, agua y monóxido de carbono. Una vez en la atmósfera, los gases sufren numerosas veces los ciclos atmosféricos rápido y lento. El enlace fotoquímico entre ambos da por resultado una conversión neta de los gases sulfurosos en dióxido de azufre; el dióxido de azufre se acumula, pues, en la atmósfera más allá de su nivel de equilibrio termoquímico. El dióxido de azufre se elimina de la atmósfera y se almacena convertido en sulfato de calcio en la corteza, mediante reacción con el dióxido de carbono y el óxido de calcio. Tras cientos de años, si no millones, el sulfato cálcico va quedando enterrado; reacciona entonces con el óxido de hierro para regenerar la pirita y completar el subciclo.

Surkov y sus colegas han encontrado abundante calcio en las rocas de la superficie venusiana. La concentración de azufre en las rocas, mucho más baja, indica que la mayor parte del calcio se encuentra en forma de óxido en silicatos y carbonatos, no en sulfatos. Por haber óxido de calcio, y la proporción de mezcla atmosférica del dióxido de azufre exceder su nivel de equilibrio, las dos sustancias deben reaccionar espontáneamente para formar sulfato de calcio. De aquí que no haya duda de que el dióxido de azufre se está eliminando de la atmósfera por el "sumidero" constituido por el óxido de calcio. Su concentración diez veces superior a la proporción de mezcla de equilibrio se puede sólo explicar mediante una muy reciente inyección geológica de gases sulfurosos.

La supuesta fuente de azufre, la pirita, es un mineral secundario, común en las rocas volcánicas terrestres. Las reacciones que producen los gases sulfurosos pueden ocurrir en la superficie de ríos de lava ricos en pirita. Podrían también tener lugar bajo la superficie, y los gases sulfurosos salir expulsados más tarde por erupciones volcánicas. De cualquier manera, lo que asegura que haya una aportación continua de gases sulfurosos a la atmósfera es un mecanismo volcánico.

Pettengill y Peter E. Ford, del MIT, acaban de recoger pruebas indirectas en torno a la existencia de vastas zonas de pirita superficial en Beta Regio, donde los mapas de radar habían revelado ya estructuras volcánicas. Obser-

7. CICLO DEL AZUFRE, responsable de la producción de las nubes de Venus; consta de tres subciclos. El subciclo geológico (*líneas en color*) comienza cuando la pirita volcánica (FeS_2) reacciona termoquímicamente, bajo el suelo o en la superficie de los ríos de lava, para formar dióxido de azufre y los gases sulfurosos H_2S y OCS. En los subciclos atmosféricos, lento (*líneas grises*) y rápido (*líneas negras*), las reacciones fotoquímicas, excitadas por la luz ultravioleta del interior de las nubes y por la casi ultravioleta subyacente a las mismas, oxidan los gases sulfurosos y producen las partículas de la nube: ácido sulfúrico (H_2SO_4) y varias formas de azufre elemental (S). El oxígeno proviene de la fotodisociación del dióxido de carbono. En la parte baja de la atmósfera, la evaporación y la reducción termoquímica por el monóxido de carbono (CO) y el hidrógeno destruyen la materia de la nube y regeneran sus precursores gaseosos. La fotooxidación conduce a una conversión neta de gases sulfurosos en dióxido de azufre, que reacciona con el óxido de calcio (CaO) de la superficie, para producir sulfato cálcico ($CaSO_4$), con lo que el azufre retorna a la corteza del planeta. (Esquema diseñado por Ilil Arbel.)

vaciones realizadas por el vehículo orbital *Pioneer Venus* mostraron que la reflectividad de la superficie venusiana a ondas de radio de 17 centímetros de longitud varía ampliamente, desde un mínimo de 3 por ciento hasta un máximo de 40 por ciento. Una zona altamente reflectora es la del Monte Theia, en Beta Regio; Pettengill y Ford defienden resueltamente que la composición de esta montaña debe diferir de la que caracteriza a las tierras bajas de pequeña reflexión que la rodean. Alta reflectividad implica alta conductividad eléctrica; llama la atención que muy pocos tipos de roca tengan la conductividad necesaria para explicar la reflectividad del Monte Theia. El candidato más idóneo es materia rocosa con inclusiones sustanciales de pirita altamente conductora. Comparadas con Beta



8. LLANURA VENUSIANA, fotografiada en marzo de 1982 por el módulo de aterrizaje *Venera 14*. La temperatura media es de 460 grados C, la presión centuplica la terrestre y la atmósfera es corrosiva. A pesar de ello, los instrumentos de *Venera 13* y *14* sobrevivieron varias horas y pudieron funcionar.

Regio, las zonas donde se posaron los *Venera 13* y *Venera 14* muestran reflectividad muy baja; esto sugiere que el azufre detectado por estas sondas se encontraba principalmente en forma de sulfato de calcio, mal conductor, y no de pirita.

La pirita de la superficie de Beta Regio podría ser el producto de recientes corrientes de lava, pero podría también haber quedado expuesta por la acción de la intemperie sobre depósitos más antiguos. Como las nubes impiden la observación directa de corrientes activas de lava o de penachos de gas y polvo, resulta imposible "demostrar" que se están produciendo erupciones volcánicas en Venus, en línea con las espectaculares fotografías de Io sacadas por el *Voyager*. En la Tierra, sin embargo, las erupciones volcánicas importantes –piénsese en la de El Chichón de 1982– envían grandes cantidades de partículas y gases sulfurosos a la alta atmósfera, donde permanecen meses enteros e incluso años. Si en Venus están ocurriendo erupciones importantes, podría esperarse que dejasen una marca observable encima mismo de las nubes.

Al parecer, lo hacen. En uno de los descubrimientos más sorprendentes de la misión *Pioneer Venus*, Larry W. Esposito, de la Universidad de Colorado en Boulder, informó el año pasado que el espectrómetro ultravioleta del vehículo orbital registraba, de 1978 a 1983, una caída del 90 por ciento entre los niveles de partículas de niebla de dióxido de azufre y ácido sulfúrico encima de las nubes. En 1978, los niveles habían superado de lejos los valores esperados por los investigadores, fundados en observaciones realizadas desde la Tierra durante los 15 años anteriores; podría haberse producido una abundancia de partículas igualmente anómala a finales de los años cincuenta. Esposito ha propuesto que, tanto a finales de los años cincuenta como en las postrimerías de los setenta, enérgicas erupciones volcánicas inyectaron directamente dióxido de azufre en la alta atmósfera. El dióxido de azufre se convierte, entonces, en ácido sulfúrico, que se deposita en la baja atmósfera. Gradualmente, la alta abundancia de dióxido de azufre y partículas de niebla encima de las nubes retorna a su valor normal.

No es necesario suponer que los penachos volcánicos asciendan, sin diluirse, 70 kilómetros, hasta la cima de las nubes; en mi opinión se trata, por lo demás, de un suceso improbable. Aun cuando el propio gas volcánico caliente no subiese hasta la cima de las nubes, la energía convectiva de una erupción importante se propagaría hacia arriba, en forma de intensas olas gravitatorias, aumentando en amplitud y terminando por romper en la región nubosa, de manera similar a como las olas oceánicas rompen en una playa. La concentración de dióxido de azufre es 500 veces mayor en la base de la nube que en su cima; la agitación turbulenta causada al romper las olas gravitatorias podría así explicar el episódico aumento del nivel de dióxido de azufre en la alta atmósfera. Cualquier justificación requiere, empero, grandes erupciones volcánicas.

Otra observación del *Pioneer Venus* podría indicar dónde se están produciendo las erupciones. Frederick L. Scarf, de la empresa TRW, y Christopher T. Russell, de la Universidad de California en Los Angeles, informaron recientemente que una antena del vehículo espacial había captado bruscos impulsos de radio de baja frecuencia, que se cree emitidos por relámpagos o rayos. Estos impulsos están conspicuamente concentrados encima de varios accidentes superficiales: Beta Regio, Atla Regio y Phoebe Regio, situada al sur de Beta. No resulta fácil explicar esa concentración si admitimos que los relámpagos se deben a la convección aleatoria en la atmósfera. Las tres regiones, no obstante, se han identificado, por su topografía, como de posible origen volcánico, y en la Tierra se han visto frecuentes descargas eléctricas en los penachos de volcanes en erupción. La indicación sugiere que, en Venus, se producirían descargas semejantes.

Ninguno de los argumentos presentados aquí es enteramente convincente por sí solo, pero unidos forman un conjunto muy sólido: existen volcanes activos en Venus, vulcanismo que constituye un eslabón clave en el ciclo químico que crea las nubes. Hasta ahora, no hay indicios claros de tectónica de placas; no cabe pues otro remedio que atribuir los volcanes de Venus a puntos calientes aislados, bastante similares a Mauna Loa, en Hawai. Los niveles de actividad volcánica en ambos planetas invitan a su comparación; algunos investigadores creen que las erupciones son incluso más frecuentes en Venus. Como mínimo, se puede establecer ya la conclusión, tras decenios de hipótesis, según la cual ese planeta cubierto de nubes, como la Tierra, está en evolución, geológicamente vivo.

Translocaciones cromosómicas y cáncer humano

Los cromosomas de las células del sistema inmunitario "trafican" a veces con segmentos de ADN. Este proceso puede activar genes causantes de cáncer, al situarlos cerca de secuencias génicas exaltadoras que multiplican su actividad

Carlo M. Croce y George Klein

Todas las células humanas contienen oncogenes, genes dotados de capacidad potencial de producir cáncer. Por lo que se ve, realizan funciones normales hasta que se produce el cambio a la malignidad. ¿Qué induce la conversión del oncogén, por la que deja de constituir una parte normal de la maquinaria genética de la célula para tornarse en fuente de transformación cancerosa o neoplásica?

A lo largo de la última década se han ido descubriendo varios mecanismos de activación de los oncogenes [véase "Base molecular del cáncer", por Robert A. Weinberg; Investigación y Ciencia, enero de 1984]. A veces, un oncogén se activa tras sufrir una "mutación puntual"; se altera un pequeño segmento del gen al recibir radiación o al actuar sobre él un carcinógeno químico. Otra forma de activarse el oncogén es por multiplicación ("amplificación"). De este modo, en una misma célula encontramos numerosas copias activas. Cuando así sucede, el nivel de expresión del gen puede ser inapropiadamente elevado; dicho con otras palabras, la célula puede fabricar excesiva cantidad de la proteína codificada por el gen. Incluso una proteína necesaria para el funcionamiento normal de la célula puede tener un efecto canceroso si se produce en grandes cantidades [véase "Proteínas de oncogenes", por Tony Hunter; Investigación y Ciencia, octubre de 1984].

También podría activarse un oncogén al incorporarse en un retrovirus (virus cuyo material genético es ARN, no ADN). Cuando un retrovirus infecta una célula animal, puede tomar de esta célula un oncogén que no está activado, que pasa a formar parte del complemento genético del retrovirus y de su descendencia. A veces, este proceso activa al oncogén, de tal manera que una posterior infección por esta cepa del retrovirus puede inducir una transformación neoplásica en una célula diferente. Por el momento no se conoce con claridad qué papel desempeñan esos mecanismos de activación en el desarrollo de tumores humanos, pues son pocos los tumores de ese tipo que portan un oncogén activado por alguno de tales procesos.

Nuestro trabajo, y el de otros investigadores, ha mostrado que existe un cuarto mecanismo capaz de activar oncogenes. Actúa en algunos cánceres de células del sistema inmunitario, denominadas células *B*. La función capital de una célula *B* es producir anticuerpos (inmunoglobulinas), las moléculas que reconocen y se unen a moléculas "no propias", o foráneas, denominadas antígenos. Para que esas células satisfagan su función, los genes que codifican la producción de anticuerpos deben expresarse en un alto nivel. Dentro de los genes que determinan la producción de anticuerpos hay secuencias genéticas que aumentan la actividad de esos genes en las células *B*. Si en un reordenamiento de los cromosomas de la célula *B* (los cromosomas son filamentos de ADN que contienen los genes de la célula) una de esas secuencias quedase yuxtapuesta a un oncogén, la expresión de éste se exaltaría, con lo que la transformación maligna pasaría a constituir una parte fundamental de la función de esa célula.

Hemos constatado que en el linfoma de Burkitt, una enfermedad maligna del sistema inmunitario que se desarrolla a gran velocidad, se dan tales reordenamientos. Los reordenamientos son el resultado de translocaciones recíprocas entre dos cromosomas de las células *B*: un segmento de cada cromosoma se desprende y se desplaza hacia el extremo del otro [*véase la figura 2*]. En la mayoría de esas translocaciones, un oncogén se sitúa en una posición próxima a una de las secuencias que exaltan la producción de anticuerpos; con menor frecuencia, el oncogén permanece en su sitio y se desplaza la secuencia exaltadora.

Dimos con ese mecanismo en el curso de una investigación iniciada a finales de la década 1970, encaminada a identificar los cromosomas que portaban los genes responsables de la producción de anticuerpos. Después de ubicar en el mapa la localización de esos genes, observamos que se albergaban en los mismos cromosomas que ya se sabía que, en el linfoma de Burkitt, aparecían translocados. Nuestro posterior trabajo de investigación nos permitió demostrar que los dos segmentos de material genético que se translocan entre los cromosomas contienen, respectivamente, un oncogén y un gen que codifica parte de la molécula de anticuerpo.

Con el propósito de averiguar qué cromosomas aportan la información genética que codifica la producción de anticuerpos, uno de nosotros (Croce) y sus colaboradores recurrieron a una técnica experimental en la que se utilizaban híbridos de células somáticas de ratón y humanas (células corporales, no óvulos ni espermatozoides).

Las células híbridas se obtienen mezclando células *B* humanas y de ratón, en un medio que contiene un factor de fusión químico o vírico que favorece la unión de algunas células de ratón con células humanas. Los híbridos resultantes poseen cromosomas humanos y de ratón. Este tipo de células híbridas pierde algunos de los cromosomas humanos durante la división celular (aunque retiene la dotación cromosómica completa del ratón); en virtud de lo cual, a medida que las células se dividen y se multiplican, las sucesivas gene-

raciones muestran cada vez menos cromosomas humanos; después de muchas generaciones, las células híbridas tendrán solamente unos pocos cromosomas humanos.

Para determinar qué cromosomas conservan los genes que codifican partes de la molécula de anticuerpo examinamos varios conjuntos de aquellas células. Cualquier célula que produzca una porción de la molécula debe contener uno de los cromosomas necesarios. Logramos determinar qué cromosomas contenían los genes para una parte de la molécula de anticuerpo observando qué cromosomas estabai. siempre presentes en las células que producían esa parte de la molécula y ausentes en las células que no la producían.

La molécula de anticuerpo consta de cuatro cadenas de proteína: las cadenas se unen dando los pares idénticos que adoptan la forma de una Y [*véase la figura 3*]. La cadena más larga de cada par se denomina cadena pesada y, la más corta, cadena ligera. Cada cadena consta de dos regiones características: la región "variable" y la región "constante". La región variable reconoce y se une a los antígenos; la región constante especifica la tarea que ha de desempeñar el anticuerpo (la llamada función efectora) después de haber encontrado y haberse unido a su antígeno. Existen muchos tipos diferentes de región variable, porque los anticuerpos son sumamente selectivos: cada uno solamente se une a su antígeno específico. Por el contrario, en las cadenas ligeras (denominadas kappa y lambda, respectivamente) sólo se hallan dos tipos de región constante, y sólo hay 10 tipos de región constante en las cadenas pesadas. Por ello, los anticuerpos contra diferentes antígenos pueden desempeñar bien la misma tarea. Cada célula *B* madura puede producir un solo tipo de anticuerpo; los cromosomas de la célula contienen ADN que codifica las regiones constante y variable específicas para ese anticuerpo [véase "Bases genéticas de la diversidad de anticuerpos", por Philip Leder; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1982].

En 1979, uno de los autores (Croce) y su equipo encontraron que las células híbridas que contenían el cromosoma



1. CROMOSOMAS de un híbrido de células de ratón y células humanas. Se distinguen cromosomas humanos (*claros*) y de ratón (*oscuros*). Uno de los cromosomas humanos (*flecha*) ha sufrido una translocación: un segmento de un extremo se ha desprendido y ha sido remplazado por un segmento de otro cromosoma. Las translocaciones pueden activar oncogenes (genes que causan cáncer) colocándolos cerca de exaltadores, que son secuencias genéticas que incrementan la actividad de otros genes que están en el mismo cromosoma. Dado que las células híbridas contienen parte del complemento genético humano (pero no todo), pueden utilizarse para determinar qué cromosomas codifican un producto humano: cualquier producto humano fabricado por una célula que contenga sólo un cromosoma humano habrá de estar determinado por ese cromosoma. Los autores utilizaron este tipo de células híbridas para identificar los cromosomas que contienen ciertos oncogenes y para estudiar el efecto de varias translocaciones sobre la regulación de esos oncogenes.

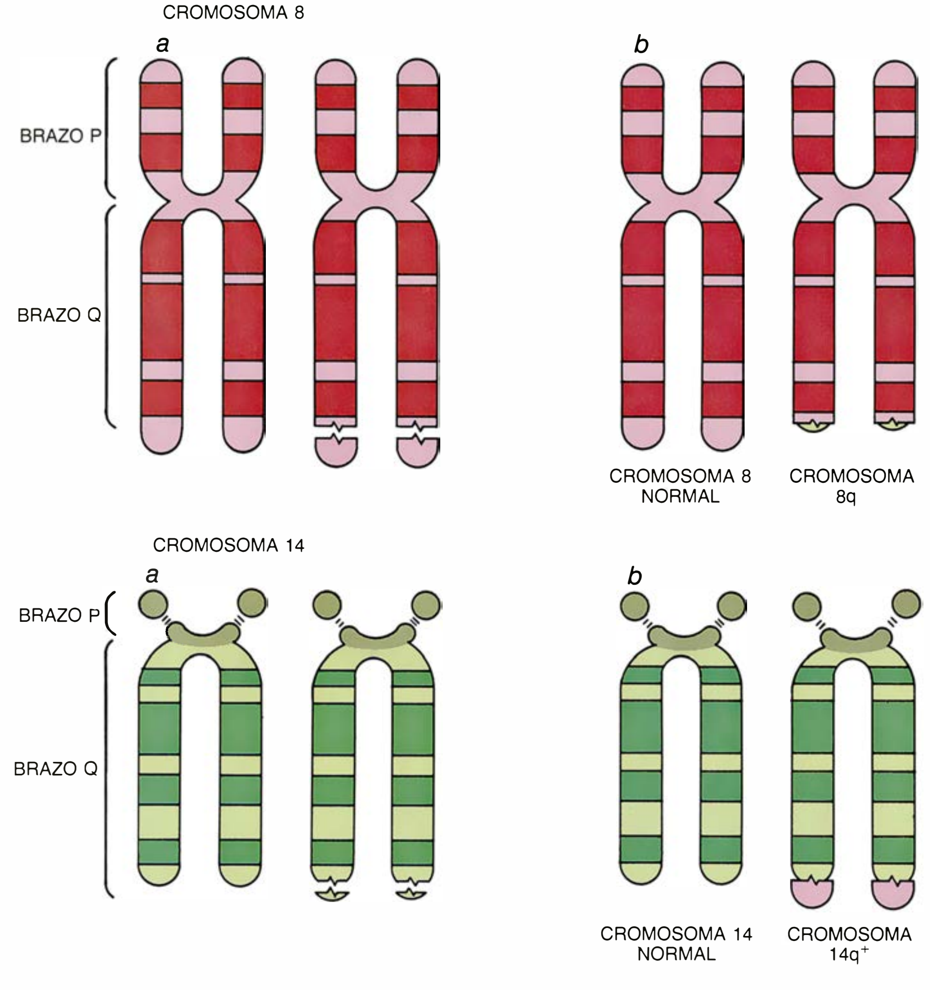
humano 14 eran las únicas que producían cadenas pesadas humanas. Aparentemente, los genes que codifican la producción de cadenas pesadas se encuentran situados en el cromosoma 14. Utilizando técnicas experimentales semejantes, Jan Erikson, Joanne Martinis y uno de nosotros (Croce) descubrimos, en 1981, que el cromosoma 22 codificaba las cadenas ligeras que llevan la región lambda constante. En 1982, O. Wesley McBride y sus colaboradores, del Instituto Nacional del Cáncer, y Terence H. Rabitts y sus colegas, del Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigaciones Médicas de Cambridge (Gran Bretaña), encontraron que el cromosoma 2 codifica las cadenas ligeras que llevan la región constante kappa.

Tales resultados encajan claramente con los que se había obtenido diez años antes del estudio de las translocaciones de los cromosomas. En 1972, George Manolov y Yanka Manolova, en la Universidad de Lund, Suecia, advirtieron una irregularidad en los cromosomas de muchas células afectadas por el linfoma maligno de Burkitt: uno de los cromosomas del par 14 (una célula somática humana posee 23 pares diferentes de cromosomas) estaba más alargado. Al observar que una sección del cromosoma, la llamada brazo q, era anormalmente larga, el matrimonio Manolov designó a este cromosoma raro como $14q^+$.

Posteriormente, Lore Zech, en colaboración con uno de nosotros (Klein), en el Instituto Carolino de Estocolmo, encontró que el cromosoma $14q^+$ era el producto de una translocación recíproca: se forma cuando un segmento de un cromosoma del octavo par se rompe, se separa y se une al cromosoma 14. Un segmento del cromosoma 14 hace lo contrario y se une al extremo del cromosoma 8. El octavo cromosoma reorganizado se denomina $8q^-$, pues tiene un brazo q más corto. Otros investigadores acaban de demostrar que pueden darse dos translocaciones más en las células del linfoma de Burkitt. En ambas está implicado el cromosoma 8; en una clase de translocación (que ocurre aproximadamente en el 16 por ciento de los casos de linfoma de Burkitt) el desplazamiento mutuo se produce entre los cromosomas 8 y 22. En aproximadamente el 9 por ciento de los casos, la translocación implica a los cromosomas 2 y 8. Tres de los cromosomas afectados en estas translocaciones, los cromosomas 2, 14 y 22, participan en la producción de anticuerpos.

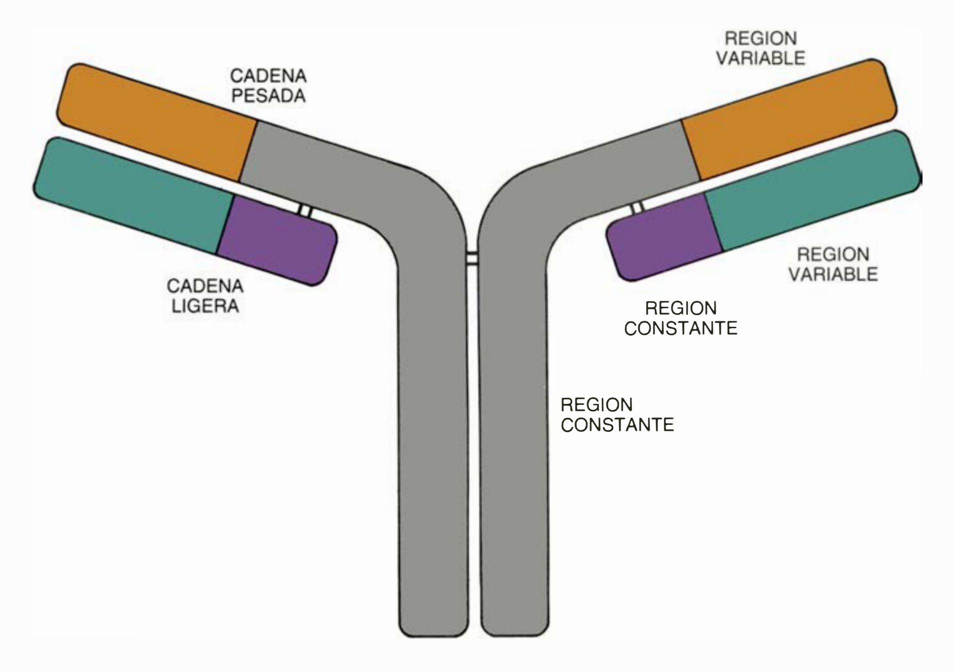
La estrecha asociación entre el linfoma de Burkitt y la producción de anticuerpos se demostraría al poco tiempo. Uno de nosotros (Croce), junto con Erikson, del Instituto Wistar de Anatomía y Biología, y Janet Finan y Peter C. Nowell, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Pennsylvania, encontró que el punto por donde se rompía el cromosoma 14 durante la translocación con el cromosoma 8 se hallaba precisamente dentro de la sección del cromosoma 14 que codifica la cadena pesada de la inmunoglobulina. En esos experimentos utilizamos, una vez más, híbridos de células de ratón y células humanas; en este caso, células del sistema inmunitario del ratón, que habían sido transformadas por un tipo de cáncer denominado plasmacitoma. Cada célula híbrida contenía, además del complemento genético del ratón, un cromosoma de una célula humana de un linfoma de Burkitt, al menos.

Tal como se esperaba, las células híbridas que llevaban el cromosoma 14 normal (el cromosoma del par número 14 que no había resultado afectado por la translocación) poseían genes para la producción de anticuerpo y, las células híbridas que tenían el cromosoma 8, no lo producían [*véase la figura 5*]. Por el contrario, los híbridos con un cromosoma 14 que hubiera participado en una translocación (el cromosoma $14q^+$) contenían los genes para las regiones constantes de las cadenas pesadas, pero no para las regiones variables. El cromosoma 8 que había participado en la translocación contenía los genes para las regiones variables. Estos resultados constituían una prueba clara de que el cromosoma 14 se rompe por un punto situado entre los genes que codifican las regiones variable y constante de la cadena pesada y de que los genes que codifican la región variable se desplazan al cromosoma 8. El locus de la cadena pesada (la parte del cromosoma 14 que codifica la cadena pesada) está, por tanto, directamente implicado en una de las translocaciones, características del linfoma de Burkitt.



2. TRANSLOCACION RECIPROCA entre los cromosomas 8 (*rojo*) y 14 (*verde*). Es la causa de la mayoría de los casos de linfoma de Burkitt, una enfermedad maligna de las células *B* del sistema inmunitario humano. Un segmento del extremo del cromosoma 8 se desprende (*a*) y se desplaza hasta el cromosoma 14 (*b*). La translocación inversa desplaza un segmento del cromosoma 14, llevándolo al cromosoma 8. Tales translocaciones recíprocas sitúan un oncogén procedente del cromosoma 8 en la proximidad de un gen del cromosoma 14, que habitualmente codifica la producción de parte de la molécula de anticuerpo. Un mecanismo que exalta la producción de anticuerpos en las células *B* normales activa luego al oncogén.

Al llegar a este punto quedaba claro que el mecanismo del linfoma de Burkitt guardaba, de alguna manera, relación con los genes que codifican la producción de anticuerpos; los siguientes datos sobre la naturaleza de esta relación provinieron de estudios con oncogenes. Dado que el linfoma de Burkitt afecta a las células *B*, estábamos especialmente interesados en un oncogén designado *c-myc*, un oncogén humano estrechamente relacionado con el oncogén *v-myc* que causa linfoma de células *B* en pollos infectados con virus de la mielocitomatosis aviar.



3. MOLECULA DE ANTICUERPO. Consta de dos pares idénticos de cadenas de proteína, unidos para formar una estructura en forma de Y. En cada par hay una cadena pesada y una ligera; cada cadena tiene una región variable y una región constante. La mayoría de los casos de linfoma de Burkitt están causados por una translocación de un oncogén al locus genético que codifica la cadena pesada. Otros, en cambio, se deben a translocaciones en los que participan genes para las regiones constantes de la cadena ligera.

En colaboración con Ricardo Dalla-Favera y Robert C. Gallo, del Instituto Nacional del Cáncer, hicimos uso de la estrecha relación entre genes *myc* humanos y aviares para construir una sonda que identificase células híbridas que incluyeran el oncogén *c-myc* humano. Nuestra sonda fue un segmento de ADN humano, marcado radiactivamente, cuya secuencia genética era muy similar a la del oncogén *v-myc*.

Para determinar si una célula híbrida contenía el gen *c-myc* humano empleamos una enzima que cortaba el material genético de la célula en pequeños segmentos; luego separamos los segmentos de acuerdo con su tamaño, siguiendo un proceso llamado electroforesis en gel. A continuación, expusimos el ADN a una solución que contenía la sonda radiactiva de ADN. Tanto el ADN celular como la sonda se habían "desnaturalizado", es decir, en cada uno de los casos, se habían separado las dos cadenas complementarias de ADN que constituían la molécula en forma de doble hélice. Por ser casi idénticas la sonda para *c-myc* y el gen *c-myc* humano, las cadenas marcadas del *c-myc* de la sonda hibridaron con el *c-myc* celular: las cadenas sencillas del ADN sonda se unieron a las cadenas complementarias de ADN celular. Al lavar la solución del ADN sonda, la parte del mismo que había hibridado quedó retenida. Después de este proceso de lavado, podía detectarse cualquier célula cuyo material genético hubiese hibridado con la sonda radiactiva, por medio de una banda radiactiva específica que aparecía sobre el papel de filtro que contenía el ADN separado a través de la electroforesis.

Utilizamos la sonda para examinar un conjunto de células híbridas de ratón y humano y determinar así la localización cromosómica del gen *c-myc* humano. Comenzamos por examinar células híbridas con cromosomas humanos normales; vimos que el cromosoma 8 humano estaba presente en todas las células que contenían el oncogén *c-myc* humano y ausente en las que no lo portaban; y concluimos, por tanto, que el oncogén *c-myc* se hallaba en el cromosoma 8.

A continuación examinamos células híbridas que alojaban los cromosomas 8 y 14 translocados, obtenidas por unión entre células de ratón y células humanas de linfoma de Burkitt. Observamos que el oncogén *c-myc* residía en el pequeño fragmento de cromosoma 8 que, de forma consistente, se translocaba al cromosoma 14 de las células de linfoma de Burkitt que contenían la translocación entre el cromosoma 8 y el 14. Este resultado indicaba que las translocaciones en las que participaba el oncogén *c-myc* desempeñaban un papel fundamental en el desarrollo del linfoma de Burkitt.

Conviene subrayar que Shinsuke Ohno, Francis Wiener y Jack Spira, trabajando en el Instituto Carolino con uno de nosotros (Klein), en colaboración con Michael Polter, del Instituto Nacional del Cáncer, habían observado translocaciones cromosómicas específicas muy similares en plasmacitomas de ratón. En este estudio se encontró que las células malignas de ratón productoras de anticuerpo incluían una translocación característica entre el cromosoma 15 y los cromosomas de ratón que poseían genes determinantes de la cadena pesada, o bien genes codificadores de la región kappa de la cadena ligera (cromosomas de ratón números 12 y 6, respectivamente). Estos resultados sugerían que los genes que codifican para las inmunoglobulinas desempeñan alguna misión en los plasmacitomas de ratón.

Posteriores experimentos realizados por uno de nosotros (Croce), Dalla-Favera y Gallo, en colaboración con Stuart A. Aaronson, del Instituto Nacional del Cáncer, y Philip Leder, de la Facultad de Medicina de Harvard, mostraron que el oncogén *c-myc* translocado al cromosoma 14 en el linfoma de Burkitt humano podía disponerse de varias maneras.

El oncogén consta de tres exones (segmentos de ADN que se transcriben a ARN mensajero, ARNm, durante el proceso de expresión a proteínas) interrumpidos por dos intrones (segmentos que constan de ADN que no se transcribe en ARNm y que, por tanto, no se expresa como proteína). La estructura del oncogén la analizaron Dalla-Favera y Gallo, con sus colaboradores, y Rosemary Watt, Giovanni Rovera y uno de nosotros (Croce), en el Instituto Wistar. En algunas translocaciones del linfoma de Burkitt, el punto de rotura en el cromosoma 8 está antes del oncogén *c-myc* completo (en el sentido que marca la transcripción), y los tres exones del gen se translocan al cromosoma 14; en otros casos, sin embargo, el punto de rotura está más allá del primer exón y sólo se translocan el segundo y el tercer exón [*véase la figura 6*]. En este caso, el oncogén está unido, "cabeza con cabeza", con uno de los



4. LOS CROMOSOMAS TRANSLOCADOS de una célula del linfoma de Burkitt difieren en longitud respecto de sus equivalentes no translocados. En la célula cuyo material genético se muestra aquí, uno de los cromosomas del octavo par ha sufrido una translocación con un cromosoma del par décimocuarto. El cromosoma octavo translocado se ha cortado y, el cromosoma 14 translocado, se ha alargado.

genes para la cadena pesada que hay en el cromosoma 14; es decir, el segmento de ADN translocado desde el cromosoma 8 se alinea en una dirección contraria a la del ADN del cromosoma 14.

Otros experimentos han mostrado que se produce un reordenamiento similar en las translocaciones asociadas a plasmocitomas de ratón. Estos estudios los realizaron en primer lugar Michael D. Cole y sus compañeros, del Hospital Clínico de San Luis, y, luego, Leder y uno de nosotros (Croce) en colaboración con Kenneth B. Marcu, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, y Jerry Adams y Suzanne Cory, del Instituto de Investigaciones Médicas Walter y Eliza Hall, de Melbourne. En plasmacitomas de ratón, el oncogén *c-myc* está reordenado y se dispone "cabeza con cabeza" con un gen para la cadena pesada de la inmunoglobulina. Sin embargo, todavía no está claro si el oncogén se transloca al locus determinante de la cadena pesada o si permanece en el cromosoma 15 del ratón cuando el locus para la cadena pesada se transloca a un punto situado en su vecindad.

A pesar de los varios ordenamientos posibles de los cromosomas en las células del linfoma de Burkitt humano, encontramos que la proteína producida por el gen *c-myc* era cualitativamente la misma. De manera específica encontramos que el primer exón de *c-myc* no codificaba una proteína: la síntesis de proteínas se iniciaba en el segundo exón. No eran, pues, los reordenamientos del gen *c-myc* durante la translocación lo que había activado sus cualidades oncogénicas; el efecto canceroso de la translocación no se debía a una alteración localizada dentro del gen.

Si el producto de *c-myc* es el mismo en células normales y en células del linfoma de Burkitt, ¿cuál es la consecuencia oncogénica de la translocación cromosómica en el linfoma de Burkitt? Tal vez la translocación hace que, de alguna manera, el producto del gen *c-myc*, del que quizá se requieran pequeñas cantidades para la función de la célula, se exprese en cantidades anormalmente elevadas.

Dicho de otra manera, es posible que la translocación permita que el gen *c-myc* evada los mecanismos que normalmente controlan su expresión. Si este es el caso, debe advertirse una diferencia entre los niveles de expresión del gen translocado y del oncogén *c-myc* normal en la misma célula. Las células con el cromosoma $14q^+$ deberían tener niveles elevados de ARNm de *c-myc*, el material genético que constituye un paso intermedio entre la presencia de un gen en un cromosoma y su expresión como proteína. Las células con cromosoma 8 normal deberían tener niveles bajos de ARN mensajero de *c-myc*.

Teniendo presente esta posibilidad, Kazuko Nishikura y nuestros colegas, del Instituto Wistar, emprendieron posteriores experimentos con híbridos de células humanas y plasmocitomas de ratón. Utilizando una técnica que permite distinguir los transcritos de ARNm de *c-myc* humano de los transcritos de ARNm de *c-myc* de ratón, encontramos que el nivel de expresión del gen *c-myc* que estaba en el cromosoma $14q^+$ era muy elevado; el gen *c-myc* del cromosoma 8 normal se transcribe relativamente poco en la misma clase de célula de plasmacitoma.

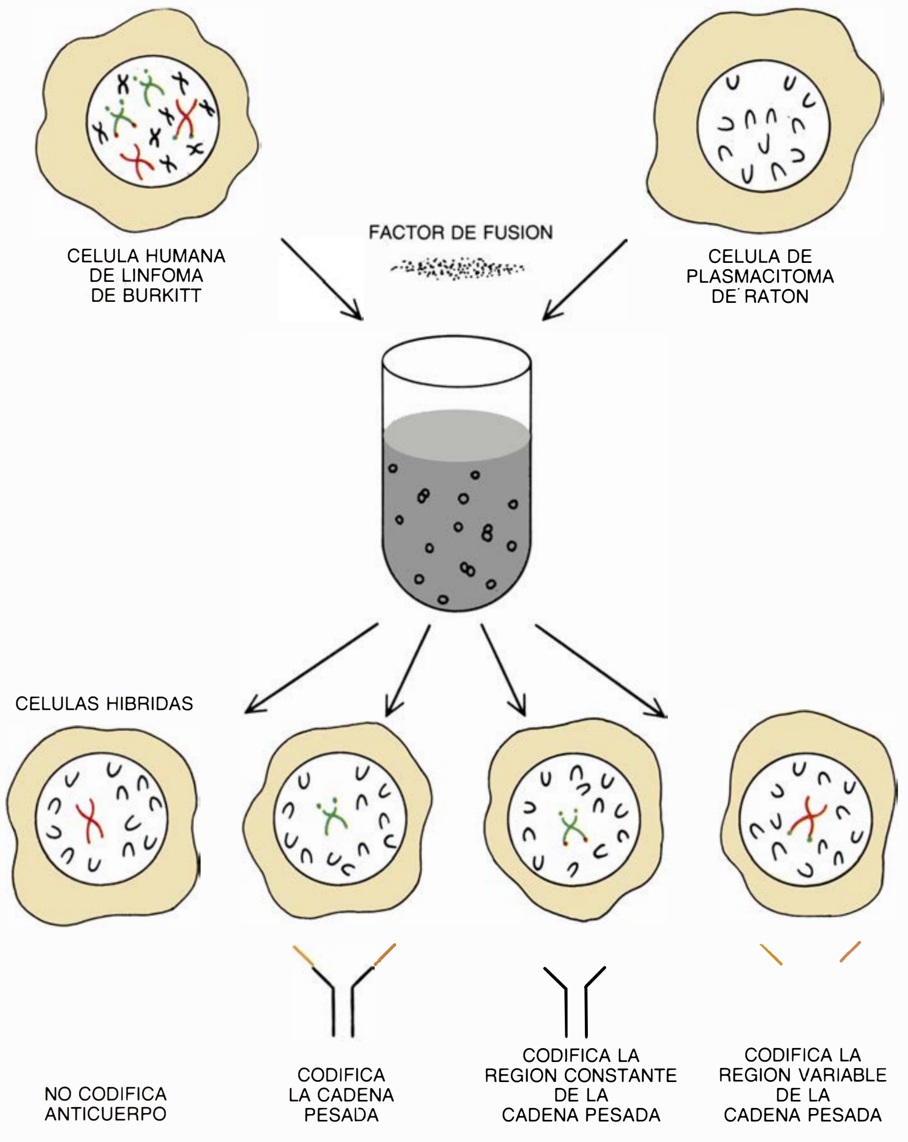
En experimentos paralelos introdujimos un gen *c-myc* de un cromosoma 8 normal en células de plasmacitoma de ratón. El gen provenía de células *B* humanas no cancerosas. Encontramos que este gen, que se había expresado (aunque a bajos niveles) en células *B* humanas normales, era completamente inactivo en células de plasmacitoma de ratón. Adams y Cory encontraron, en otros estudios, que el gen *c-myc* de ratón ubicado en células de plasmacitoma de ratón no se expresaba. Por tanto, mientras que el gen *c-myc* normal (no translocado) está reprimido a un nivel base en las células de plasmacitoma de ratón, un oncogén *c-myc* translocado al locus de la cadena pesada en el cromosoma 14 se escapa, no sabemos cómo, de los mecanismos que controlan normalmente la transcripción.

Examinamos también transcritos de ARNm de *c-myc* de células de linfoma de Burkitt que llevaban una translocación variante. En estas células, el primer exón del gen *c-myc* permanece en el cromosoma 8 y, los otros dos exones, se reordenan "cabeza con cabeza" con los genes que están en el cromosoma 14 (todas esas células tenían un cromosoma 8 normal, además del cromosoma translocado). En estos casos resulta relativamente fácil advertir la diferencia entre el ARNm del gen translocado y el del gen del cromosoma 8 normal: el gen translocado se ha reordenado parcialmente y, por tanto, diferirán sus transcritos de ARNm. En tales células, Abbas ar-Rushdi y otros colaboradores nuestros observaron elevados niveles de ARNm procedente del gen *c-myc* translocado, pero no a partir del gen *c-myc* normal.

Estos resultados indican que el oncogén *c-myc* pierde la regulación como resultado de su proximidad a genes que codifican anticuerpos. Esta conclusión se ve reforzada por la información obtenida en dos translocaciones observadas en el linfoma de Burkitt, en la que no participa el cromosoma 14. Una de estas translocaciones se da entre el cro-

mosoma 8 y el 22, cromosoma este último que contiene genes que codifican cadenas ligeras del tipo lambda. La otra, entre el cromosoma 8 y el 2, cromosoma que porta genes que determinan cadenas ligeras kappa. En ambas translocaciones, tal como demostró uno de nosotros (Croce) en colaboración con Nowel y con Gilbert Lenoir, de la Agencia Internacional para Investigaciones sobre el Cáncer de Lyon, el gen *c-myc* permanece en el cromosoma 8, donde se le une una secuencia que codifica la producción de anticuerpo (en un caso por el locus para la cadena ligera lambda y en el otro por el locus kappa). Cualquiera de esas dos translocaciones puede activar el oncogén, haciéndole insensible a los mecanismos que normalmente controlan la expresión. Aparentemente, el oncogén *c-myc* no necesita desplazarse para expresarse a niveles elevados.

¿A qué atribuir la desregulación del oncogén *c-myc* que toma parte en estas translocaciones? Una observación experimental sugiere una respuesta: el oncogén *c-myc* translocado del linfoma de Burkitt está reprimido en las células híbridas que proceden de fibroblastos de ratón (células de tejido conectivo), mientras que se expresa fuertemente en los híbridos que proceden de células de plasmacitoma (células malignas productoras de anticuerpos). Parece que la translocación tiene efecto oncogénico solamente en las células que producen anticuerpos, células en las que las regiones del cromosoma necesarias para la producción de anticuerpo son particularmente activas.



5. RESIDE EL PUNTO DE ROTURA de un cromosoma 14 en translocación dentro de la región que codifica la cadena pesada del anticuerpo, tal como mostró este experimento. Una célula de linfoma de Burkitt humano que contenía los cromosomas 8 y 14, tanto translocados como sin translocar, se fusionó con una célula del plasmacitoma de ratón (una célula cancerosa del sistema inmunitario del ratón). Las células híbridas contenían uno de los cromosomas procedentes de la célula humana. Las células híbridas que portaban el cromosoma 8 normal (*rojo*) no producían anticuerpo. Las células con un cromosoma 14 normal (*verde*) fabricaban la cadena pesada del anticuerpo. El cromosoma 14 implicado en la translocación contenía genes para la región variable de la cadena pesada. Aparentemente, en el proceso de translocación el cromosoma 14 se rompe justo entre los loci que codifican las regiones constante y variable.

Tales regiones cromosómicas contienen un tipo de secuencia genética que se conoce como un exaltador (*enhancer*). Los exaltadores son secuencias de ADN que parecen incrementar los niveles de transcripción de ciertos genes ubicados en el mismo cromosoma. Son un descubrimiento reciente y todavía se conoce poco de su funcionamiento. Algunos investigadores de los laboratorios de Kathryn L. Calame, de la Universidad de California en Los Angeles, de Walter Shaffner, de la Universidad de Zurich, y de Susumu Tonegawa, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), han encontrado secuencias exaltadoras en el segmento de ADN que codifica la región constante de la cadena pesada de un tipo de inmunoglobulina. Estudios recientes, realizados en el Instituto Wistar, sugieren la presencia de otros exaltadores en el locus de la cadena pesada. Además, David Baltimore y sus colaboradores, del MIT, han encontrado secuencias exaltadoras dentro de las regiones del cromosoma que codifican la región constante de la cadena ligera kappa.

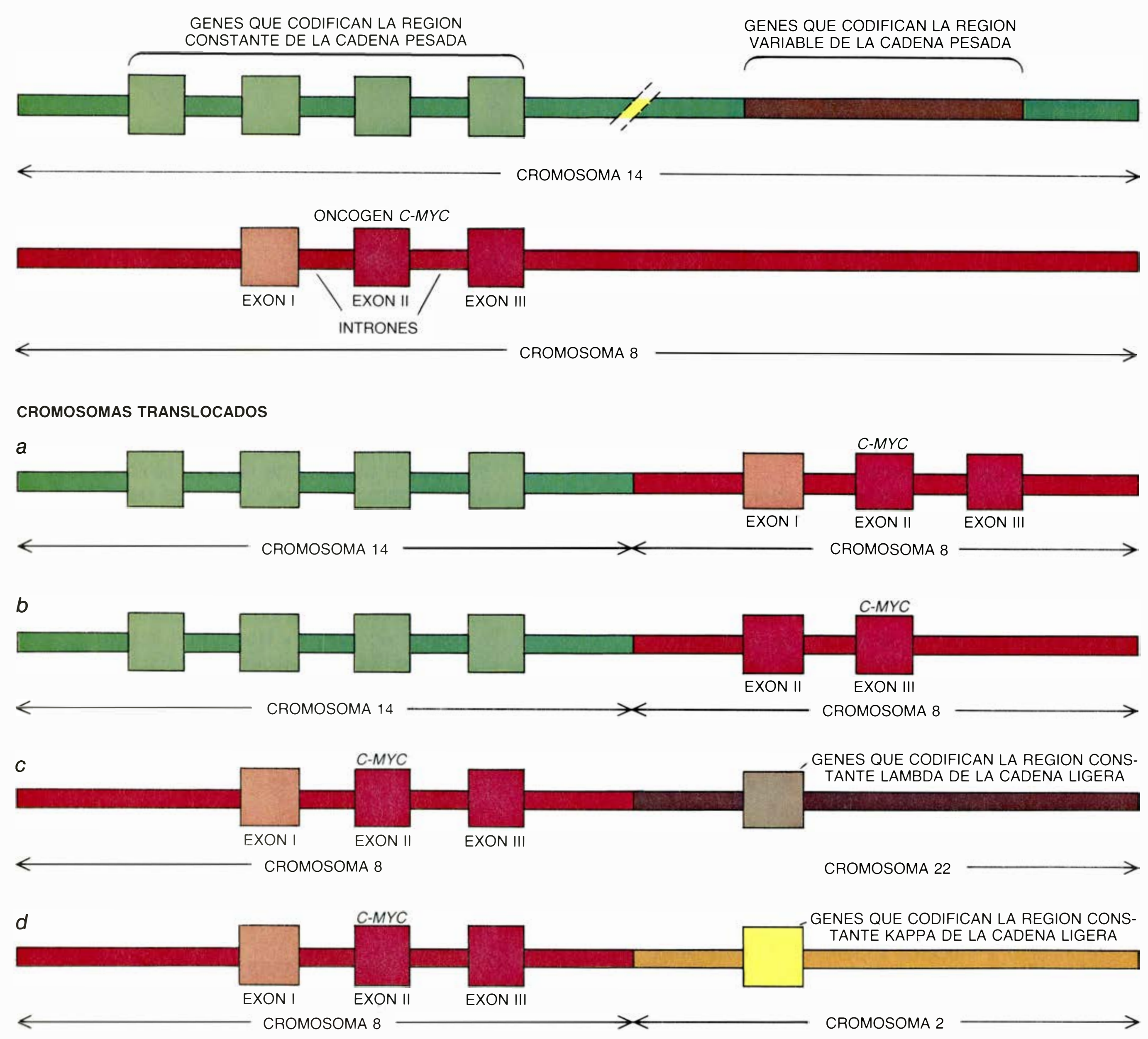
Estos hallazgos sugieren un posible mecanismo para el linfoma de Burkitt: translocaciones cromosómicas dentro de una célula *B* colocan un oncogén *c-myc* en yuxtaposición a los exaltadores; éstos logran activar la transcripción a distancias considerables. El gen *c-myc* se expresa entonces de la misma manera que se expresan los genes de la inmunoglobulina en una célula *B* normal. En cierto sentido, la expresión del oncogén *c-myc* se convierte en una parte de la función especializada de la célula.

Resultados obtenidos recientemente indican que este mecanismo de oncogénesis pudiera ser responsable de otras muchas enfermedades malignas en las que están implicadas células del sistema inmunitario humano. Jorge J. Yunis, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Minnesota, ha desarrollado un nuevo método de bandeo, tinción de los cromosomas, que permite la detección precisa de cambios cromosómicos específicos en las células malignas. Sus aplicaciones de esta técnica sugieren que la mayoría de las enfermedades malignas de las células *B* están marcadas por cambios cromosómicos. Las translocaciones entre el cromosoma 14 y segmentos, tanto del cromosoma 11 como del cromosoma 18, son comunes en linfomas de células *B* en adultos, en leucemias crónicas de células *B* humanas y en el mieloma múltiple. Esta observación, combinada con nuestros co-

nocimientos acerca del papel del locus de la cadena pesada de la inmunoglobulina que está en el cromosoma 14 en el linfoma de Burkitt, indica que puede haber oncogenes humanos en los cromosomas 11 y 18; a esta hipótesis la apoya el trabajo realizado por Yoshihida Tsujimoto, en el Instituto Wistar, en colaboración con Yunis y Nowell. Por nuestra parte, hemos encontrado que los puntos de rotura de estas translocaciones estaban, de forma consistente, arracimados en pequeños segmentos de los cromosomas 11 o 18. Además, los puntos de rotura siempre están opuestos al segmento del cromosoma 14 que codifica la región constante de la cadena pesada. Hemos propuesto las designaciones *bcl-1* y *bcl-2* (por *B*-cell lymphoma/leukemia 1 y 2) para los dos supuestos oncogenes que están en los cromosomas 11 y 18.

Las observaciones hechas durante el estudio del linfoma de Burkitt abren dos nuevas áreas importantes de investigación. En primer lugar, está el tema de los exaltadores. ¿Cuáles son las secuencias precisas del ADN que constituyen un exaltador? y ¿cómo incrementa el exaltador el nivel de transcripción de ciertos genes? El otro campo abierto a la investigación se refiere al oncogén *c-myc*. ¿Cuál es la función de ese gen en una célula normal y por qué la expresión de *c-myc* a elevados niveles habría de causar malignidad?

Además de estas nuevas áreas de investigación, nuestro trabajo sugiere nuevas formas experimentales de abordar el estudio de los neoplasmas de células *B*. Muchas de estas enfermedades malignas implican la translocación de un oncogén desconocido al locus de la cadena pesada que está en el cromosoma 14. El locus de la cadena pesada se conoce relativamente bien, y existen sondas de ácido nucleico que permiten



6. DIVERSAS TRANSLOCACIONES pueden causar linfomas de Burkitt. En el caso común (*a*) los tres exones (secuencias de ADN que pueden codificar proteínas) del oncogén *c-myc* se desplazan desde el cromosoma 8 hasta una sección del cromosoma 14 que está al lado de genes que codifican la región constante de la cadena pesada del anticuerpo. O bien (*b*), el cromosoma 8 puede romperse por el primer intrón (segmento de ADN que no se transcribe a ARNm) del oncogén, en cuyo caso sólo dos exones se desplazan al cromosoma 14. En otras, el oncogén *c-myc* permanece en el cromosoma 8, mientras que los genes que codifican la región constante de la cadena ligera del anticuerpo se unen a él. En tal caso (*c*), los genes que codifican las regiones constantes "lambda" se translocan del cromosoma 22; pueden también participar genes del cromosoma 2 que codifican las regiones constantes "kappa" (*d*).

a un investigador estudiar segmentos de ADN próximos a él. Dado que las translocaciones tienden a poner al oncogén en estrecha proximidad con el locus de la cadena pesada, estas sondas proporcionarán a los investigadores los instrumentos para identificar, aislar y caracterizar genes conectados con la mayoría de los cánceres humanos de células *B*. De esta manera, el conocimiento de la genética de la producción de anticuerpos proporcionará el conocimiento de la estructura genética de oncogenes aislados recientemente.

El trabajo realizado con translocaciones cromosómicas puede conducir también a nuevos métodos para diagnosticar y caracterizar cánceres del sistema inmunitario. Los puntos de rotura de los cromosomas, por ejemplo, se asocian a pequeños segmentos de ADN que se dan en las enfermedades malignas de células *B* y que muestran translocaciones entre los cromosomas 11 y 14 o entre los cromosomas 14 y 18. Debería resultar posible, por tanto, desarrollar sondas de ADN que fueran específicas para estos breves fragmentos. Podría tomarse una muestra de tejido del área afectada de un paciente, utilizándose las sondas de ADN para determinar con precisión qué clase de reordenamiento cromosómico es el responsable de la malignidad.

Resultados muy recientes indican que las lecciones aprendidas de las enfermedades malignas de células *B* quizá sean también aplicables a enfermedades malignas de células *T*, el otro componente principal del sistema inmunitario. Uno de nosotros (Croce), en colaboración con Rovera y con Mark M. Davis, de la Universidad de Stanford, ha encontrado que el gen para la cadena alfa del receptor de la célula *T* se encuentra en la región del cromosoma 14 que está implicada en algunas translocaciones características de ciertos cánceres que afectan a células *T*.

Nuestros estudios sobre el mecanismo que subyace al linfoma de Burkitt tienen, por tanto, implicaciones que van más allá de una enfermedad. Parece que las translocaciones del linfoma de Burkitt proporcionan un modelo aplicable a la mayoría de los cánceres humanos de células *B* (y tal vez también de los cánceres de células *T*). Además, el conocimiento del mecanismo de translocación proporcionará poderosos instrumentos experimentales, no sólo para el estudio de otros cánceres, sino también para el estudio de los mecanismos que controlan la expresión genética durante el desarrollo normal y el funcionamiento del sistema inmunitario humano.

Ciencia y sociedad

Joyas de Ampurias

La joya constituye un documento a través del cual podemos conocer un momento de la historia de un pueblo, su economía, su desarrollo tecnológico, relaciones comerciales e incluso sus mitos y creencias.

Partiendo de este dato, podemos aportar un nuevo punto de vista sobre la ciudad de Ampurias y su historia, a través del mensaje encerrado en las joyas que sus habitantes usaron, apreciaron e incluso crearon. Ampurias es una fundación de los griegos de Focea en la famosa Costa Brava, situada en uno de los extremos del golfo de Rosas, en la provincia española de Gerona.

Las joyas halladas en el yacimiento de Ampurias cubren un intervalo cronológico atendiendo a su tecnología, estilo, formas y materiales que va, en el caso de las 408 primeras piezas estudiadas, de ~1100 a J.C. hasta el siglo II de nuestra era. Se prescinde de la estratigrafía en que se hallaron, ya que una joya puede tener fácilmente una continuidad de uso de doscientos años o en ciertos casos más, excepción hecha de los anillos de sello, que en general son enterrados con su dueño, ya que era su *firma*.

Los tipos de joya más empleados son: anillos, pendientes, pulseras, collares, colgantes y, en cuantía menor, diademas, broches y otros. La calidad de las joyas abarca todo el espectro. Desde las más sencillas confeccionadas en plomo, estaño, hierro, cobre o bronce, hasta las confeccionadas con metales nobles: oro, plata y electrón (aleación natural de oro y plata) de diversa calidad y tonalidades. El oro y la plata aparecen, en algunos casos prácticamente puros. En bronces y plomos ampuritanos se encuentra la plata en proporciones bastante elevadas.

Las técnicas de soldadura muestran un notable grado de desarrollo. Usan aleaciones que, además de plomo y estaño, tienen antimonio e incluso níquel. La pureza de la plata tiene que ver, al parecer, con la técnica empleada para su obtención: galena argentífera, triturado, lavado, tostación, amalgama con mercurio (separación de la plata por disolución en el mercurio quedando así libre el plomo) y evaporación del mercurio de la amalgama de plata, recuperándolo por condensación y dejando la plata pura libre.

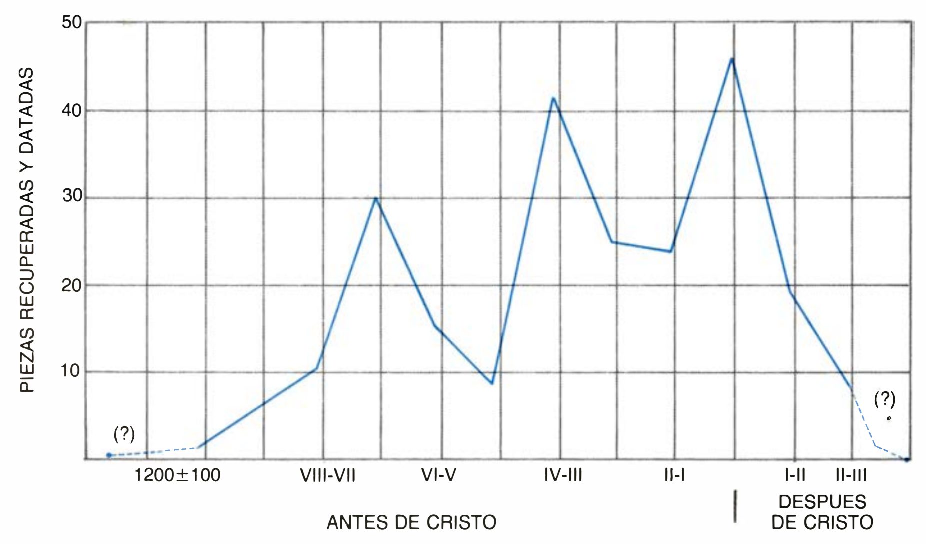
Para este proceso se necesita un horno, provisto de una buena fuente de aire, obtenida mediante fuelles accionados desde el exterior e insuflado a través de unas conducciones de cerámica, en la parte inferior del mismo; el combustible (carbón vegetal de encina) permite así alcanzar fácilmente los 700 grados Celsius suficientes para tostar los sulfuros, tales como la galena argentífera (sulfuro de plomo y plata), cinabrio (sulfuro de mercurio), pirita (sulfuro de hierro) y calcopirita (sulfuro de cobre y hierro).

El proceso da humos de anhídrido sulfuroso molestos, por lo que las instalaciones deberían hallarse a extramuros de la ciudad, en una zona donde los vientos predominantes soplaran en dirección contraria a la ciudad y preferentemente hacia el mar. En el caso del mercurio, los humos, en especial en el proceso de condensación, son tóxicos.

Como datos de partida en nuestra investigación poseíamos una serie de materiales y minerales hallados en Ampurias; minerales como las galenas argentíferas, piritas, calcopiritas, cinabrio, casiterita, oligisto, feldespatos auríferos y otros. Materiales descubiertos son hornos de diversos tipos, escorias de fundición de variada composición, ladrillos refractarios, conducciones, toberas y otros.

Los resultados de los primeros análisis, realizados por espectrometría (procedimiento que permite determinar partes por billón de un cuerpo y la cantidad del mismo en la muestra), nos ha proporcionado la identificación de la procedencia de algunos tipos de plata (en los pueblos de Osor, Anglés y Palafrugell, dentro de la misma provincia de Gerona) y de cinabrio (Sierra castellonense del Espadán). Las casiteritas son del tipo gallego-portugués e inglés. La inglesa ("cornwall") y la portuguesa ("panasqueira") se distinguen por su cristalización e impurezas acompañantes.

Gemas y materiales de adorno de las joyas presentan una rica variedad. Su calidad oscila desde la esmeralda hasta la esteatita o el alabastro, siendo las más comunes las ágatas y las cornalinas, de óptimas calidades. Hay ágatas de Idar-Obersten (Alemania). El ámbar es de procedencia nórdica. (Marsella es una fundación focense, y su comercio con Ampurias, también fo-



1. Cantidad de piezas recuperadas en función de la época a que pertenecen. El intervalo entre el 1100 y el siglo VIII *a.J.C. arroja un corto número de ejemplares, fruto quizá del comercio de intercambio o de enterramientos accidentales. A partir del siglo* VIII*, el número de piezas halladas se incrementa rápidamente hasta alcanzar un primer punto máximo al final del Período Arcaico e inicio del Clásico griego. Del* VI *al* IV *aparece un descenso, quizás a causa de las Guerras Médicas; la calidad de sus joyas es magnífica. La guerra del Peloponeso acelera su caída en las proximidades del siglo* IV*. En el* IV-III *aparece otro punto máximo, que coincide con Alejandro Magno y el Período Helenístico en el que destaca la tecnología, pureza de los materiales y belleza de las joyas. En los siglos* III-II*, quizás a consecuencia de las Guerras Púnicas, invasión cartaginesa e invasión romana (desembarco en Ampurias, en el 218, de los Escipiones, y pocos años después de Catón) hay un nuevo descenso seguido de una rápida recuperación que alcanza el nivel más elevado en el cambio de era (época de Augusto); se inicia después un lento pero constante descenso, que se pronuncia a finales del siglo. Con Marco Aurelio y finalmente con Séptimo Severo se llega al punto más bajo.*



2. Las doce joyas son una pequeña muestra significativa de la calidad, belleza y nivel tecnológico del arte ampuritano. El oro con el que han sido construidas es prácticamente puro (22 quilates) o aleado con plata o cobre para darle una mayor pureza. Los dos anillos son entallos en oro y ágata. Uno de los pendientes es una pieza excepcional, pues lleva engarzadas nueve perlas y una esmeralda. El colgante en forma de rana es de cornalina. Los dos colgantes de oro, de la parte inferior derecha, llevan decoración realizada con técnica de graneado.

cense, era intenso. Marsella era la terminal occidental de la ruta del ámbar nórdico.)

En muchos casos, las gemas, están talladas. Abundan también camafeos y escarabeos. El entallo (talla en hueco, que, al utilizarla como sello, da la figura en relieve sobre la superficie blanda en la que se aplica) se usaba como *firma*. La temática de estos entallos es dispar. Hay figuras masculinas y femeninas, animales, plantas, símbolos. La forma más corriente es la figura femenina; entre los ampuritanos gozan de amplia popularidad Afrodita/Venus y el delfín.

(Este trabajo inicial ha sido posible gracias a la ayuda y facilidades dadas por el Museo Arqueológico de Barcelona y el Museo Monográfico de Ampurias, con cuya ayuda prosigue hoy. Hemos recuperado más de 3000 gemas, lo que nos permitirá obtener una mayor información sobre el yacimiento príncipe de la arqueología catalana. Las espectrografías se realizan en el Servicio de Espectroscopía de la Universidad de Barcelona; el estudio y análisis de las gemas, mediante el instrumental facilitado por el Laboratorio de Gemología, de la Escuela de Artes y Oficios de la Diputación de Barcelona. Manuel Medarde Sagrera.)

¿Nuevo planeta?

Se trata de "un objeto que *no* es una estrella, que gira en órbita alrededor de otro que *sí* es una estrella. ¿Cómo lo llamaremos? Según las definiciones astronómicas en uso, 'planeta' es la elección obvia". Con ese rodeo, Donald W. McCarthy, Jr., de la Universidad de Arizona, anunciaba la primera observación directa de otro sistema solar.

McCarthy, Frank J. Low, también de Arizona, y Ronald G. Probst, de los National Optical Astronomy Observatories, han observado una enana marrón. Se cree que éstas se forman igual que las estrellas, a partir del colapso de gas y polvo interestelar. Sin embargo, a diferencia de las estrellas, las enanas marrones no tienen materia suficiente para alimentar reacciones termonucleares. La radiación que emiten, fundamentalmente en el infrarrojo, procede en su mayor parte de la energía del colapso. Jill Tarter, del centro de investigación Ames de la NASA, postuló en 1975, a partir de razonamientos teóricos, la existencia de enanas marrones. Este constituye el primer avistamiento aceptado de una de ellas.

La enana marrón observada por McCarthy y sus colaboradores orbita alrededor de una estrella débil, Van Biesbroeck 8, a una distancia de unas 6,5 unidades astronómicas. (Una unidad astronómica, unos 150 millones de kilómetros, es la distancia media entre el Sol y la Tierra.) Van Biesbroeck 8 y su compañera enana se hallan a unos 21 años-luz de la Tierra. Los investigadores han bautizado la enana marrón Van Biesbroeck 8B, o VB 8B.

El grupo de McCarthy descubrió VB 8B durante un examen de "binarias astrométricas" débiles, estrellas cuyo movimiento frente a estrellas "fijas" distantes muestra irregularidades periódicas. De la perturbación de su movimiento se deduce que esas estrellas sufren la influencia gravitatoria de acompañantes. Los investigadores lograron distinguir la luz infrarroja de VB 8B de la emisión de Van Biesbroeck 8, mucho más intensa, valiéndose del método denominado interferometría de manchas (*speckle interferometry*). En esa técnica, el astrónomo reúne una serie de exposiciones extremadamente breves, de modo que, sacando el promedio, se elimina la distorsión provocada por la turbulencia aleatoria de la atmósfera terrestre.

Algunos astrónomos dudan en calificar de planeta a VB 8B, por su estrecha semejanza con una estrella, tanto en su composición como en su historia. Responde a ello McCarthy que VB 8B guarda un parecido intenso con Júpiter. Ambos objetos tienen casi el mismo radio, si bien la masa de VB 8B es entre 10 y 70 veces la de Júpiter. Este satisface algunas de las primeras definiciones de "enana marrón", señala McCarthy. Es más, si VB 8B ocupara el lugar de Júpiter en el sistema solar, mostraría una brillantez semejante en las longitudes de onda del visible, y se hubiera clasificado entre los planetas.

Más alcohol, menos cerebro

Desde hace unos 30 años se sabe que el cerebro de los alcohólicos crónicos tienden a encogerse; el cambio va acompañado de debilidad mental y de pérdida de habilidad física. La tomografía axial computarizada (TAC) acaba de revelar que esas limitaciones afectan también a personas que beben de manera moderada. Un estudio de sus consecuencias a largo plazo, realizado por Lesley A. Cala y sus colegas, del Hospital Reina Isabel II, de Australia, muestra que el efecto es parcialmente reversible si el bebedor se abstiene de tomar alcohol varios meses.

La muestra de Cala agrupaba 240 alcohólicos y 59 "grandes bebedores", considerando el punto divisorio la ingestión de 120 gramos de alcohol puro por día. Es esa la cifra que da la Organización Mundial de la Salud para definir a un alcohólico. El examen por TAC reveló atrofia cerebral en el 95 por ciento de los alcohólicos y el 67 por ciento de los grandes bebedores.

Ampliaron su estudio a bebedores ligeros y moderados. Encontraron que entre 65 personas que tomaban 61 gramos de alcohol diarios, el 85 por ciento padecía lesiones cerebrales. Se apreciaron deficiencias psicométricas en el 70 por ciento y, lesiones hepáticas, en el 10 por ciento.

Para determinar los efectos de la abstinencia, el grupo de Cala se centró en 26 bebedores ligeros y moderados que aceptaron suspender la ingesta durante seis meses. Los investigadores informan en la *Australian Alcohol/Drug Review* que la atrofia cerebral disminuyó y que "se observaron mejorías... en los resultados biométricos y en la bioquímica".

Por último, estudiaron 12 abstinentes de seis meses que volvieron a la bebida otros seis meses (con un consumo medio de 47 gramos diarios). No encontraron "deterioro significativo... en los valores de atrofia del examen por TAC o en los rendimientos psicométricos".

Cala y sus colegas concluyen que el consumo de unos 40 gramos de alcohol diarios no daña el cerebro y que la abstinencia invierte la lesión "en el rango de consumo social". No se sabe, concluyen los autores, "cuántas veces podría reexponerse el cerebro a los niveles iniciales de ingesta de alcohol, seguido de abstinencia, sin incidir en la capacidad de recuperación".

Invernadero eocénico

Hace entre 50 y 55 millones de años, a principios del Eoceno, en la latitud de Groenlandia florecían bosques templados; la tierra, en conjunto, tenía temperaturas unos cinco grados Celsius superiores a las de hoy. La causa, afirman Robert M. Owen y David K. Rea, de la Universidad de Michigan, quizá fuera un efecto invernadero provocado por la liberación de dióxido de carbono a la atmósfera a partir de una cadena de fenómenos tectónicos y biológicos de las cuencas oceánicas.

Exponen esos autores en *Science* que gran parte del dióxido de carbono liberado por los océanos es consecuencia indirecta de la actividad hidrotermal que se registra a lo largo de las dorsales mesoceánicas, donde se genera corteza oceánica. En ellas, el agua de mar penetra por las grietas y fisuras, alcanza el

basalto caliente y emerge de nuevo, produciendo fuentes calientes en el suelo oceánico. En ese proceso se enriquece el contenido en metales del océano; de calcio, entre otros.

El calcio disuelto lo extraen los organismos, que lo incorporan a sus caparazones y esqueletos en forma de carbonato cálcico. En esas reacciones se consume iones bicarbonato, que también se hallan disueltos en el agua; por cada molécula de carbonato cálcico sintetizada en la reacción se libera una molécula de dióxido de carbono. El ritmo de la reacción aumentaría, sostienen Owen y Rea, en respuesta a un aumento de la concentración de calcio marino.

Coinciden diversas pruebas en que a principios del Eoceno se produjo un pico de actividad hidrotermal que aumentó bruscamente el contenido en calcio del océano. Las fuentes hidrotermales arrastran también grandes cantidades de hierro, que cubre el suelo oceánico adyacente con sedimentos ricos en hierro. Así, la distribución vertical de esos sedimentos en los testigos extraídos del suelo oceánico constituye un registro de la actividad hidrotermal que se dio en el pasado. Esos sedimentos abundan especialmente en las muestras que datan de principios del Eoceno. Muestras más recientes señalan que, en una escala local, la actividad hidrotermal alcanza un máximo durante los episodios de redistribución tectónica, cuando se desplazan una dorsal o una falla transformante. Se sabe que a comienzos del Eoceno se produjo un realineamiento mundial de márgenes tectónicas.

El registro sedimentario confirma que el nivel marino de calcio se incrementó coincidiendo con el máximo de actividad hidrotermal eocénico. En depósitos de fósiles marinos de hace unos 50 millones de años la razón entre estroncio y calcio, que se mantiene constante durante gran parte del tiempo geológico, cae drásticamente, reflejo probable de una abundancia inusual de calcio en el agua marina. La elevada concentración de calcio la sugiere igualmente la gran potencia de los depósitos marinos, que reúnen una proporción doble de la habitual.

Owen y Rea consideran que esa situación en el mar se vio acompañada de un gran aumento de la concentración del dióxido de carbono atmosférico. Puesto que esa molécula atrapa la radiación infrarroja, el efecto invernadero caldeó el clima terrestre. Pudo haberse dado esa misma secuencia de fenómenos en otros momentos de la historia geológica.

Las dimensiones ocultas del espacio-tiempo

El espacio-tiempo, que en general se considera tetradimensional, puede tener hasta siete dimensiones adicionales. Estructuras con once dimensiones, hoy en estudio, pueden dar una explicación unificada de las cuatro fuerzas básicas

Daniel Z. Freedman y Peter van Nieuwenhuizen

El 29 de mayo de 1919 la sombra de un eclipse total de sol barrió el Atlántico, desde el oeste de Africa hasta el norte del Brasil. Expediciones organizadas por el gobierno británico, bajo la iniciativa de Sir Arthur Stanley Eddington, estaban preparadas para observar las estrellas cercanas al obscurecido disco solar. Entre sus objetivos principales Eddington pretendía comprobar una nueva teoría de la gravedad propuesta por Einstein cuatro años antes: la teoría de la relatividad general, que afirma que la geometría del universo viene determinada por su contenido en masa y energía. De forma más precisa, de acuerdo con la relatividad general, el espacio y el tiempo se entrelazan en una estructura matemática tetradimensional denominada espacio-tiempo. La fuerza de la gravedad constituye aquí un efecto de la curvatura intrínseca del espacio-tiempo.

Los seguidores del eclipse querían comprobar uno de los efectos observacionales predichos por el espacio-tiempo curvado de Einstein. Según la relatividad general, el camino seguido por la luz procedente de las estrellas, al llegar a la proximidad del sol, se curvaría en virtud de la atracción gravitacional de éste. Cuando el disco solar estuviera cerca de la posición de una estrella, ésta aparecería desplazada de su ubicación usual en el cielo. La comprobación de la teoría debía esperar un eclipse solar, porque sólo entonces se pueden ver estrellas cerca del sol. Las observaciones del eclipse dieron a Einstein fama universal. Las estrellas se desplazaban exactamente en la cantidad predicha; el éxito de la formulación geométrica que Einstein dio de la gravitación quedó rotundamente confirmado.

Aunque la relatividad general se formula en una geometría de sólo cuatro dimensiones, el imaginativo trabajo de Einstein abrió las puertas a aplicaciones más atrevidas de su idea fundamental. En el mismo año en que el concepto de un universo tetradimensional había sido confirmado por la astronomía observacional, Theodor Franz Eduard Kaluza, joven y desconocido investigador de la Universidad de Königsberg, en la que es ahora ciudad soviética de Kaliningrado, envió un trabajo a Einstein. En él, Kaluza proponía que las cuatro dimensiones del espacio-tiempo se completasen con una quinta dimensión espacial.

Kaluza introdujo una quinta dimensión para dar una explicación unificada de todas las fuerzas conocidas de la naturaleza. En aquel tiempo sólo se conocían dos fuerzas fundamentales: la gravitación, descrita por la relatividad general, y el electromagnetismo, que lo explicaba la teoría de James Clerk Maxwell y otros. Las dos fuerzas se muestran muy distintas. Piénsese que todas las partículas están sometidas a la gravedad, pero sólo las partículas cargadas lo están al electromagnetismo. En 1914, Gunnar Nordström, de la Universidad de Helsingfors (actual Helsinki), había intentado dar una descripción unificada de estas fuerzas manifiestamente distintas, demostrando que ambas surgían de una forma pentadimensional del electromagnetismo. La formulación de Nordström tuvo que abandonarse porque no lograba explicar la desviación de la luz cerca del sol. Kaluza probó que las dos fuerzas podían emerger de una versión pentadimensional de la relatividad general.

En la última década, muchos físicos han puesto un interés renovado en el programa geométrico de Kaluza sobre la unificación de las fuerzas de la naturaleza. En el programa actual deben considerarse estructuras geométricas con más de cinco dimensiones, pues sabemos ya que existen cuatro fuerzas, no dos sólo. Las dos nuevas fuerzas son la nuclear fuerte, que liga los protones y los neutrones en el interior del núcleo atómico, y la nuclear débil, que es responsable de ciertos tipos de desintegraciones radiactivas. Más aún, se acepta hoy que no cabe omitir, en ningún esquema de unificación, los efectos de la mecánica cuántica. Entre los avances recientes más sugestivos destacaré la teoría de la llamada supergravedad. Aunque, dentro de la supergravedad, hay distintas posibilidades para el número de dimensiones del espacio-tiempo, la teoría es matemáticamente más elegante cuando se formula en once dimensiones.

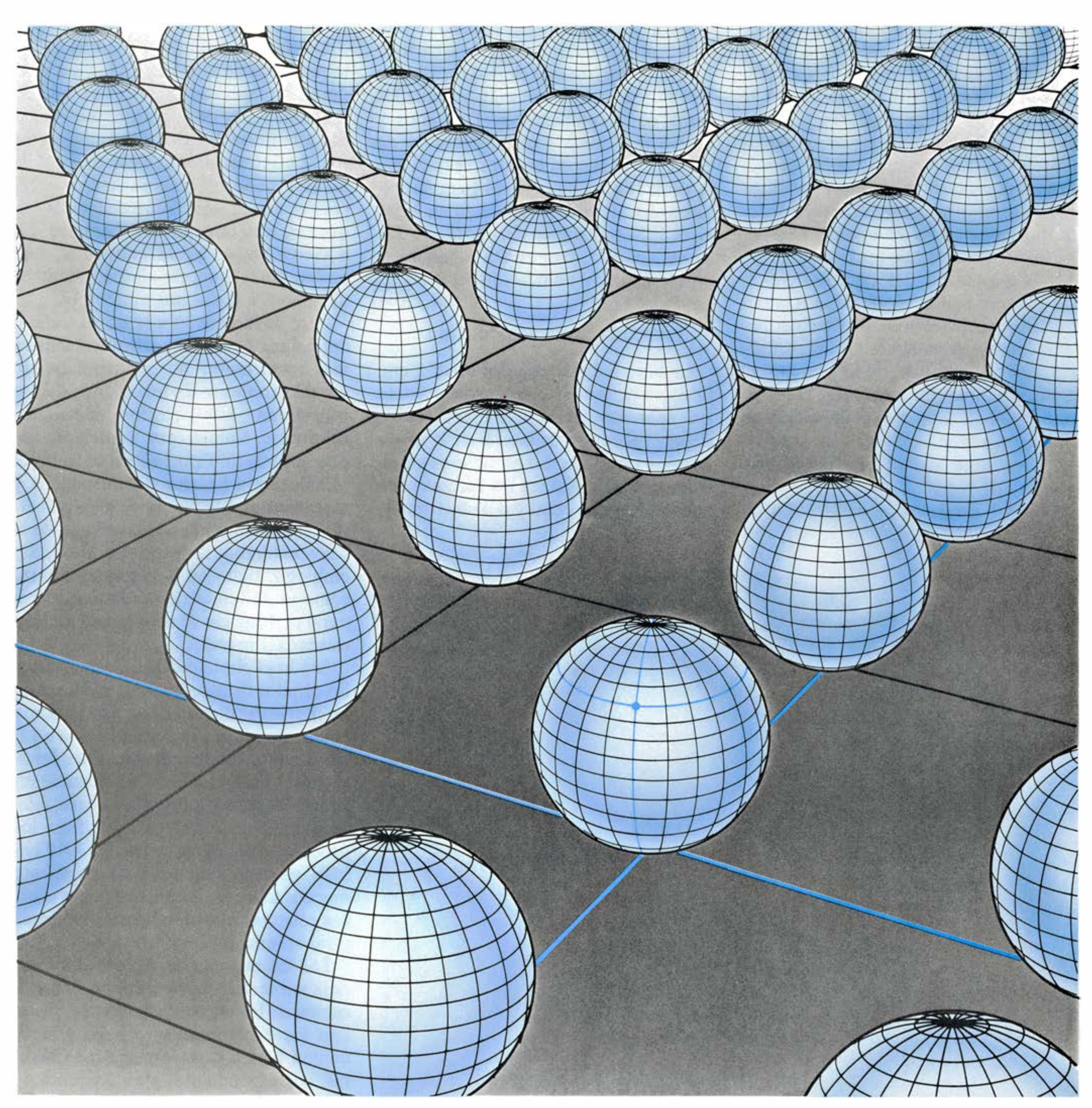
¿Por qué son necesarias 11 dimensiones? El número se origina de una curiosa coincidencia matemática. Las teorías de supergravedad pueden formularse en cualquier número de dimensiones espacio-temporales hasta once; de doce dimensiones en adelante, la teoría parece carecer de sentido. Por otro lado, siete es el menor número de dimensiones ocultas que se necesitan para acomodar las tres fuerzas no gravitacionales en una teoría del tipo de la propuesta por Kaluza. Junto a las cuatro dimensiones del espacio-tiempo ordinario, las siete dimensiones ocultas conducen a un universo de 11 dimensiones. Dato curioso: las exigencias matemáticas para la supergravedad coinciden con las limitaciones físicas impuestas por la descripción de las fuerzas.

Relatividad general

La teoría de la relatividad general ideada por Einstein corona la física clásica. En su esencia, la supergravedad, al igual que cualquier otra teoría basada en las ideas geométricas de Kaluza

para unificar las fuerzas de la naturaleza, es una extensión de las ideas de la relatividad general. Einstein propuso la relatividad general tras nueve años de búsqueda de una teoría de la gravitación. La teoría debía mantenerse concorde con su teoría de la relatividad especial y con la observación experimental, conocida desde Galileo, según la cual todos los cuerpos siguen la misma trayectoria en un campo gravitacional. Einstein razonó así: puesto que la trayectoria de un cuerpo en caída libre no depende de su masa, ni de su composición interna, su movimiento bajo la acción de la gravedad debía estar ligado a las mismas propiedades del espacio-tiempo. Y demostró de qué modo interpretar la fuerza en tanto que manifestación de una propiedad del espacio-tiempo llamada curvatura.

Para mejor apreciar este punto de vista, imaginemos la superficie curvada de una esfera. La superficie es bidimensional: se necesitan dos coordenadas, latitud y longitud, para especificar un punto de la misma. El camino más corto que une dos puntos de la esfera y yace enteramente sobre la superficie es el arco más corto del círculo máximo que pasa por ambos puntos. Este dato geométrico básico se aplica constantemente para determinar la ruta aérea



1. SIETE DIMENSIONES OCULTAS DEL UNIVERSO se han propuesto en una teoría que intenta unificar las fuerzas de la naturaleza; pueden representarse como una pequeña estructura compacta, verbigracia, una esfera asociada a cada punto del espacio en cada instante de tiempo. En la teoría de Einstein de la relatividad general, espacio y tiempo se combinan en una estructura tetradimensional llamada espacio-tiempo. Las observaciones astronómicas prueban que, a gran escala, el espacio-tiempo constituye una geometría casi plana o euclídea. El plano de la ilustración representa la geometría del espacio-tiempo ordinario; las líneas coordenadas a lo largo de un eje representan el espacio y las líneas coordenadas a lo largo del segundo eje, perpendicular, indican el tiempo. Las esferas que hay en las intersecciones de las líneas coordenadas representan las dimensiones adicionales arrolladas, postuladas en la nueva teoría. Sólo se sugiere la apariencia de la estructura. Las esferas deben imaginarse como tangentes al plano en cada punto. Además, las esferas y el plano dan origen a cuatro dimensiones sólo, no a las 11 de la teoría. Las cuatro dimensiones son las cuatro coordenadas que especifican un punto.

más eficiente sobre la tierra. Se puede imaginar una superficie curvada que sea más complicada que la esfera, pero de nuevo existe el camino más corto sobre la superficie que conecta cualquier par de puntos. Tal camino se llama geodésica, de las palabras griegas que significan "división de la tierra".

En relatividad general el espacio-tiempo es un análogo tetradimensional de una superficie arrugada. Y es tetradimensional porque se precisan cuatro coordenadas para especificar un punto. En el espacio-tiempo, el punto puede ser un suceso físico, verbigracia, la colisión entre dos partículas. El suceso se especifica diciendo dónde y cuándo tiene lugar: por sus tres coordenadas espaciales y por su tiempo. Una geodésica en el espacio-tiempo es el análogo a una geodésica sobre una superficie. Es un camino, en el espacio-tiempo, entre dos sucesos que está privilegiado por la geometría del espacio-tiempo. De acuerdo con la teoría de la relatividad general, cualquier partícula sobre la que actúa únicamente la fuerza de la gravedad sigue una geodésica en el espacio-tiempo. De esta forma la relatividad general explica la observación de Galileo según la cual todos los cuerpos en caída libre siguen una trayectoria común.

Como Kaluza, en su descripción de las fuerzas unificadas, adoptaba el método de la relatividad general, envió su artículo a Einstein para que lo patrocinase. En aquel tiempo, un artículo podía ser publicado sólo si había sido presentado por un físico reputado; con clases de "privat dozent", Kaluza no llegaba muy lejos y contaba sólo con el dinero de las pequeñas cuotas que le abonaban los estudiantes que asistían a sus lecciones. Einstein, que también había empezado su carrera como "privat dozent", quedó entusiasmado con el artículo, pero en una serie de cartas a Kaluza le sugirió que ciertos problemas de la teoría fueran más estudiados antes de su publicación. Dos años y medio más tarde Einstein cambió de opinión y le mandó una postal en la que le prometía recomendarlo para su publicación. El artículo apareció en la revista *Sitzungsberichte der Berliner Akademie* en 1921, con el título "Sobre el problema de la unificación en física".

La teoría unificada de Kaluza

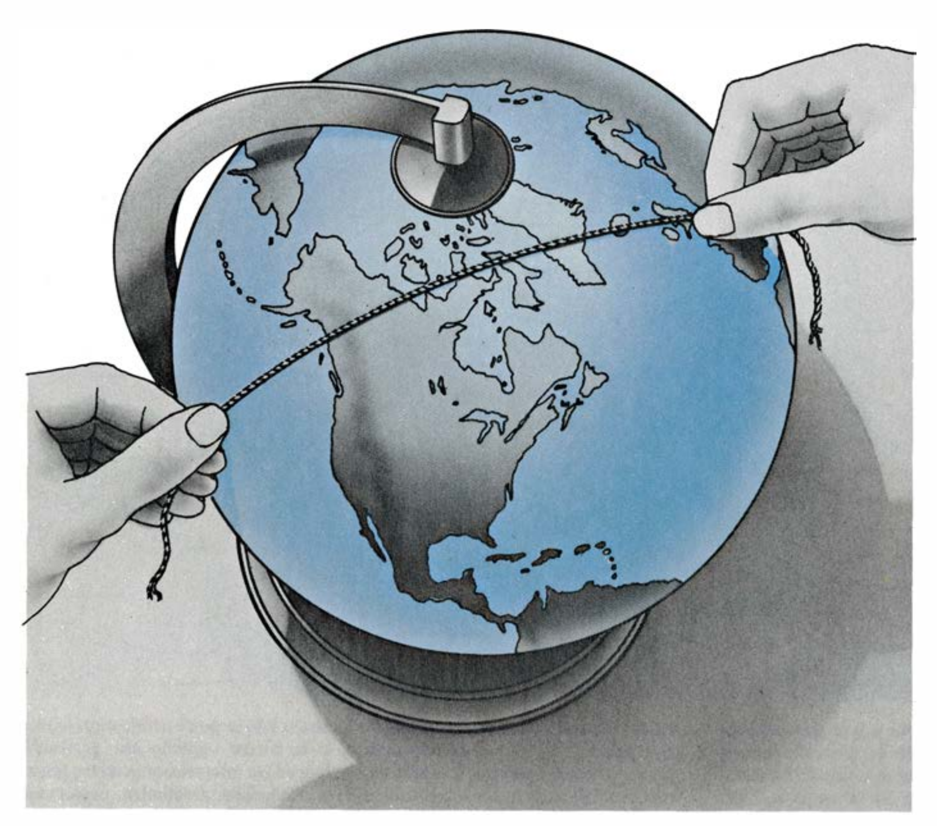
La búsqueda de una explicación unificadora de todos los fenómenos físicos sin aparente relación ha constituido siempre el centro de interés de la investigación científica. Lo escribimos antes, en la teoría de Kaluza las fuerzas ordinarias de la gravedad y del electromagnetismo surgen de una versión pentadimensional de la relatividad general. Para justificar por qué no se observan cinco dimensiones, Kaluza supuso que determinadas magnitudes, curvatura entre ellas, no dependían de la quinta coordenada. Las partículas siguen geodésicas en cinco dimensiones, pero estos caminos aparecen en cuatro dimensiones, como los caminos de las partículas sometidas a la acción conjunta de la gravedad y el electromagnetismo.

Desde la perspectiva actual, el defecto palmario de la teoría de Kaluza reside en su consideración de las fuerzas fundamentales de la naturaleza, limitadas a la gravedad y el electromagnetismo. La interacción nuclear fuerte y la nuclear débil no se conocían en 1919 porque actúan sólo sobre distancias pequeñas, del tamaño del diámetro del núcleo. No se había construido aún aceleradores que estudiaran procesos dinámicos a distancias tan cortas.

Pero cuando salió a la luz el trabajo de Kaluza había una dificultad teórica más importante: no contemplaba un notable conjunto de fenómenos que se consideran hoy efectos mecánico-cuánticos. Kaluza era consciente de esta limitación. Concluía así su trabajo: "Cada teoría [clásica o determinista y mecanicista] que clama validez universal está amenazada por la esfinge de la física moderna, la teoría cuántica". Sin embargo, tanto en la teoría de Kaluza como en la teoría de la relatividad general de Einstein se adopta una imagen clásica del mundo.

Según el punto de vista clásico, todos los objetos físicos, hasta las menores de las partículas elementales, actúan como balas sometidas a la acción de una o varias fuerzas fundamentales. Para fenómenos a gran escala, el planteamiento clásico funciona muy bien, pero falla totalmente a la hora de justificar los procesos a escala atómica. En 1919 habían quedado ya puestos de manifiesto muchos fallos de las explicaciones clásicas relativas a los fenómenos atómicos y subatómicos.

Las limitaciones de la física clásica se dejaban sentir, sobre todo, en su explicación de los espectros atómicos. Prueban los experimentos que los átomos emiten luz en rayas espectrales discretas, correspondientes a un conjunto de frecuencias, o colores distintivos del átomo emisor. Ahora bien, de acuerdo con la teoría clásica un átomo debería emitir luz de todas las frecuencias, porque en esta teoría los electrones que giran en el átomo han de descubrir un movimiento espiral hacia el núcleo.

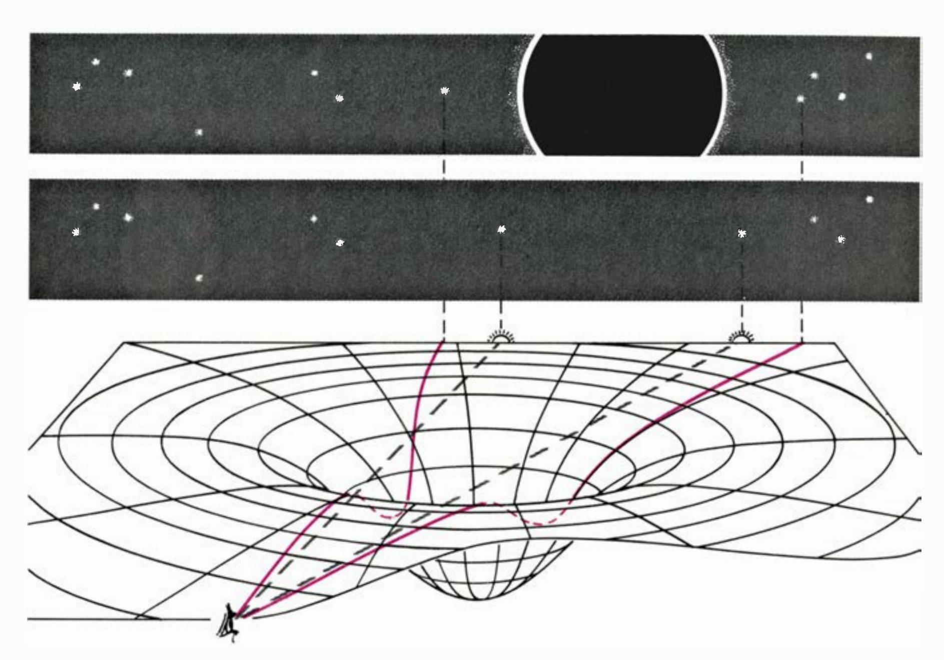


2. SE LLAMA GEODESICA SOBRE UNA ESFERA a la distancia más corta entre dos puntos que puede medirse sobre su superficie. En un globo, una geodésica es el arco más corto del círculo máximo que atraviesa los dos puntos. Puede determinarse manteniendo una cuerda tensa entre uno y otro punto.

Más aún, en la imagen clásica el camino en espiral del electrón conduciría rápidamente a un colapso del átomo; por tanto, la materia tal como la conocemos no podría existir.

La resolución de esta paradoja y de otras dificultades condujo al desarrollo de la mecánica cuántica. En cuyo contexto se abandona el determinismo estricto de la teoría clásica. Los caminos en espiral de los electrones alrededor del núcleo quedan reemplazados por estructuras ondulatorias en el espacio-tiempo. La intensidad de la vida determina la probabilidad de encontrar un electrón en un punto dado.

Las estructuras ondulatorias estacionarias corresponden a estados de movimiento del electrón de larga vida media; cada estado de movimiento tiene una energía característica. La luz se emite en frecuencias discretas, que corresponden a las líneas espectrales discretas, cuando un electrón salta repentinamente de un estado a otro. El estado de movimiento correspondiente al nivel de energía más bajo es estable, y, por tanto, los átomos no colapsan en la teoría cuántica, pero sí lo harían en el marco de la física clásica. Las estructuras ondulatorias de los electrones se obtienen como soluciones de una ecuación diferencial formulada por Erwin Schrödinger, en la que el tiempo y las tres coordenadas espaciales se consideran variables.



3. DESVIACION DE LA LUZ que procede de una estrella y que pasa cerca del sol: se trata de un efecto predicho por la teoría de la relatividad general. De acuerdo con la misma, la estructura geométrica del espacio-tiempo en las proximidades del sol se curva debido a la propia masa solar, de forma análoga al conjunto de ejes coordenados curvados que se representan. La luz debe seguir una geodésica en el espacio-tiempo; por esa razón, los rayos de luz que provienen de las estrellas se curvan cuando éstas se hallan cerca del disco solar (*color*). Cuando se observan las estrellas durante un eclipse de sol, aparecen desplazadas alejándose del astro. Las líneas discontinuas indican el camino de la luz con un sol distante.

La quinta dimensión

En 1926, en los inicios de la era cuántica, el físico sueco Oskar Klein intentó determinar si la mecánica cuántica era o no compatible con la teoría pentadimensional de Kaluza. Klein formuló una versión de la ecuación de Schrödinger que tenía cinco variables en lugar de cuatro. Probó que las soluciones de la ecuación podían interpretarse como ondas en un espacio ordinario tetradimensional, que se moviera bajo la acción de campos gravitacionales y electromagnéticos. En mecánica cuántica las ondas reciben también el tratamiento de partículas. La teoría de Kaluza-Klein abriga hoy todas aquellas teorías que, en el marco de la mecánica cuántica, intentan unificar las fuerzas fundamentales de la naturaleza en un espacio-tiempo con más de cuatro dimensiones.

En los trabajos originales de Kaluza y Klein no estaba claro si la quinta dimensión debía entenderse físicamente real o mero artificio matemático, necesario para obtener la gravitación y el electromagnetismo de una manera uniforme. Sin embargo, la introducción de la mecánica cuántica sugiere contestaciones plausibles a varias preguntas importantes acerca de la realidad física de la dimensión adicional. ¿De qué forma podría ser real la nueva dimensión? ¿Por qué no se ha detectado hasta ahora un aspecto tan fundamental del universo? ¿Cómo descubrir experimentalmente la dimensión adicional?

Para dar respuestas a estas preguntas comencemos por imaginar una línea de longitud indefinida a la que se asocia en cada punto un pequeño círculo. Si en cada punto se construye realmente un círculo, la estructura resultante será un cilindro de longitud infinita. Puede afirmarse que la línea unidimensional y el círculo unidimensional generan un cilindro bidimensional.

De forma análoga se engendrará una estructura tetradimensional a partir de un plano bidimensional y la esfera bidimensional. La nueva estructura vendrá a ser un plano donde se ha construido una esfera en cada uno de sus puntos. Es tetradimensional porque, para especificar un punto en el plano y especificar un punto en la esfera, se requiere, en ambos casos, dos coordenadas [*véase la figura 3*].

En los dos ejemplos anteriores la línea y el plano representan la geometría casi plana del espacio-tiempo tetradimensional en que vivimos. El círculo y la superficie esférica representan la nueva dimensión o dimensiones de un espacio-tiempo de más dimensiones. Un espacio-tiempo pentadimensional se puede entender como la estructura generada por el espacio-tiempo ordinario y la superficie de una esfera. En estas estructuras hay un círculo o una esfera asociadas con cada punto del espacio e instante de tiempo.

Podemos ver ahora cómo la quinta dimensión del espacio-tiempo alcanza realidad física en la teoría de Kaluza, y, a pesar de ello, no haberse detectado aún. Un concepto fundamental de la mecánica cuántica es el principio de indeterminación de Werner Heisenberg. Toda partícula es como un paquete de ondas diseminadas en cierta región del espacio. De acuerdo con el principio de indeterminación, el tamaño mínimo de la región dependerá de la energía de la partícula: cuanto mayor sea la energía de la partícula, menor será el tamaño mínimo de la región.

Para detectar una pequeña estructura espacial se recurre al microscopio, instrumento que ilumina una estructura con fotones de luz, electrones o haces de algún otro tipo de partículas. Por resolución del microscopio se entiende el tamaño mínimo de la región que se ilumina; por tanto, de acuerdo con el principio de indeterminación la resolución depende de la energía de las partículas en el haz que produce la iluminación. Para observar estructuras cada vez menores se necesitan partículas de energía creciente.

Supongamos que la quinta dimensión estuviera arrollada en un círculo extremadamente pequeño. Para detectar el círculo, la energía de las partículas que lo iluminaran debería ser suficientemente alta. Las partículas con energía demasiado pequeña se esparcirían uniformemente por el círculo, y por tanto no lo podríamos detectar. Los aceleradores más potentes producen hoy partículas de energía suficiente para resolver estructuras de un tamaño de 10^{-16} centímetros. Si el círculo de la quinta dimensión es menor que 10^{-16} centímetros no podremos detectarlo todavía.

Partículas con masa

Hay otra forma más indirecta de inferir la existencia de una quinta dimensión. Al igual que las estructuras de ondas estacionarias de un átomo corresponden a estados de movimiento de vida media larga de los electrones orbitantes, así también ondas estacionarias sobre el círculo de la quinta dimensión corresponden a partículas que podrían observarse en el laboratorio. Las estructuras de las ondas estacionarias deben encajar de forma exacta en la circunferencia del círculo. Por tanto, la onda tendrá una amplitud constante o bien un número entero de oscilaciones deberá cubrir todo el círculo: una, dos o tres o más oscilaciones [*véase la figura número 6*].

La masa de cada partícula observable depende de su longitud de onda, que es la circunferencia del círculo dividida por el número de oscilaciones que la onda desarrolla alrededor del círculo. Cuanto menor sea la longitud de onda, tanto mayor será la energía de la onda y mayor también la masa de la partícula asociada. En la teoría de Kaluza, las partículas portadoras de menor masa son las asociadas con una longitud de onda infinita; en otras palabras, la amplitud de la onda en la quinta dimensión es constante. Tales partículas tienen masa nula.

La primera partícula masiva de la teoría es aquella cuya longitud de onda es igual a la circunferencia del círculo. Tiene, pues, una masa inversamente proporcional a la circunferencia. La masa de la segunda partícula pesada dobla la masa de la primera, pues corresponde a la longitud de onda que encaja perfectamente dos veces en la circunferencia del círculo. De forma análoga, las otras estructuras de ondas estacionarias sobre el círculo generan una serie de partículas cuyas masas son múltiplos enteros de la masa de la primera partícula pesada.

Klein elaboró un razonamiento que permite estimar la masa de la primera partícula pesada. Puesto que la teoría de Kaluza intenta unificar las fuerzas de la gravedad y del electromagnetismo, la primera partícula pesada también tiene una carga eléctrica que es inversamente proporcional a la circunferencia del círculo. Por otro lado, la carga de todas las partículas elementales que se han observado es un múltiplo entero de la carga del electrón. Si se supone que la primera partícula pesada tiene esta carga, se puede calcular su masa. La masa es de un tamaño asombroso: 10^{16} veces la masa del protón, es decir, pesa más que 10.000 bacterias. No hay ninguna posibilidad de que los aceleradores actuales o en perspectiva generen estas partículas, pero quizá se produjeron durante la gran explosión (big-bang). Aunque la mayor parte de ellas se habrán desintegrado, cabe la posibilidad de detectar algunas con el tiempo.

Habida cuenta de la masa tan alta que las partículas adquieren en la teoría de Kaluza, la única partícula de la teoría que podría corresponder a las partículas hoy día observadas es la partícula de masa nula. Se sabe ya, aunque se desconocía cuando se formuló la teoría, que efectos mecánico-cuánticos más sutiles conducen a una masa finita, no nula, para la partícula predicha por la teoría. Así pues, la partícula sin masa de la teoría de Kaluza y otras partículas carentes también de masa en las generalizaciones de la teoría podrían explicar, al menos en principio, las partículas que se observan.

La circunferencia del círculo en la quinta dimensión que podría dar origen a las partículas masivas predichas por la teoría es pequeña en justa correspondencia: alrededor de 10^{-30} centímetros. Para detectar una estructura tan sutil con aparatos al alcance de nuestro desarrollo técnico tendríamos que disponer de un acelerador de varios años luz de longitud.

Tras las investigaciones de Klein y posterior trabajo de Einstein y de Wolfgang Pauli apenas si se progresó en la idea básica de unificación de Kaluza. Hubo que esperar hasta las postrimerías de la década de los setenta. En efecto, hasta entonces la mayor parte del trabajo moderno sobre la unificación de las fuerzas se fundaba en una estrategia que no necesitaba de espacios de mayor dimensión. La estrategia puede plantearse en una propuesta diferente para la unificación de la gravedad y electromagnetismo hecha por el matemático alemán Hermann Weyl, en 1918. La idea central de la teoría de Weyl afirmaba que la descripción de una fuerza no se alteraba por los cambios que se introducen en las escalas de longitud de las reglas o las escalas de tiempo de los relojes que se asocian

21 de abril de 1919

La idea de que las cantidades asociadas con el campo eléctrico quedan mutiladas... me ha perseguido también con tenaz insistencia. Sin embargo, nunca se me había ocurrido la idea de que esto pueda lograrse mediante un mundo cilíndrico pentadimensional; me parece enteramente nueva. A primera vista, su idea me gusta mucho...

Si cuando lea su minuciosa exposición no se me ocurre ninguna objeción irreparable y manifiestamente fatal, me sentiré muy honrado en presentar su trabajo a esta academia.

28 de abril de 1919

He leído su trabajo, que me parece del mayor interés. No he visto nada que resultara imposible. Si bien he de reconocer que los argumentos que Vd. desarrolla no me parecen suficientes del todo. Me gustaría que considerara lo siguiente (quizás antes de publicar su trabajo, aunque no me permitiría aconsejarle en este asunto).

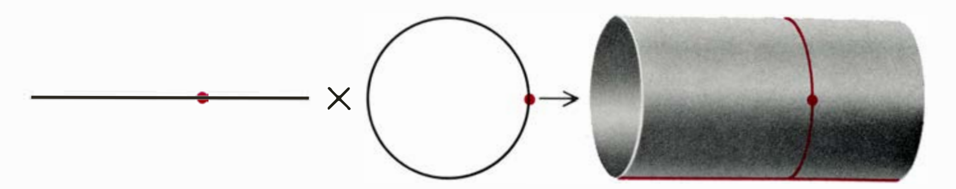
De acuerdo con su teoría básica, debería suponerse que las líneas geodésicas que son oblicuas a las secciones... darían las trayectorias de las partículas cargadas eléctricamente bajo la acción simultánea de un campo gravitacional y un campo eléctrico. Si usted pudiera demostrar que esto sucede con la exactitud derivada de nuestro conocimiento empírico, tendría en mí un convencido de su teoría.

14 de octubre de 1921

He dado vueltas sobre la parte que tuve, hace dos años, en la postergación de la publicación de su idea en torno a la unificación de la gravedad y de la electricidad. Su manera de abordar el problema me parece de todas formas más interesante que la de H. [Hermann] Weyl. Si lo desea, y me lo manda, presentaré su trabajo a la academia.

4. CARTAS DE EINSTEIN a Theodor Franz Eduard Kaluza. Se asiste a la evolución seguida por las distintas respuestas de Einstein ante las ideas de Kaluza. Las fechas muestran que pasaron más de dos años antes de que Einstein recomendara la publicación del trabajo de Kaluza, editado finalmente en 1921.

como instrumentos de medida en los distintos puntos del espacio-tiempo. Este principio se llama invariancia de contraste, aforo o "gauge", en razón de los contrastes ("gauges") o instrumentos de medida a que se refería Weyl. Tal teoría se llama una teoría gauge de campos o, abrevidamente, una teoría gauge.



5. EN LA TEORIA DE KALUZA, la quinta dimensión sería un círculo asociado a cada punto del espacio-tiempo ordinario. Si una dimensión del espacio-tiempo ordinario se representa como una línea, el modelo análogo a la estructura pentadimensional propuesta por Kaluza admitirá una representación visual. Se trata de una línea a la que se asocia un círculo en cada punto; en otras palabras, un cilindro. Una sección circular del cilindro figura la estructura del espacio-tiempo pentadimensional vacío.

Unificación electrodébil

La teoría de Weyl, que no daba una descripción físicamente correcta de la gravedad, acabó por abandonarse. Lo que no impidió que el principio de la invariancia de contraste se convirtiese en el eje de las teorías modernas sobre partículas elementales. En 1954, C. N. Yang, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, y Robert L. Mills, de la Universidad estatal de Ohio, desarrollaron una clase de teorías de contraste o aforo conocidas por teorías gauge no-abelianas. Estas teorías constituyen una generalización importante de la teoría de Maxwell del electromagnetismo; la teoría matemática de los grupos de simetría desempeña un papel central. En la teoría de grupos se estudian las rotaciones y las reflexiones en un espejo de un objeto sólido, que dejan invariantes en su aspecto los objetos. Así, el aspecto de una esfera no cambia al realizar una rotación rígida alrededor de su centro; el grupo que expresa matemáticamente esta simetría recibe el nombre de $SU(2)$.

Muchos físicos teóricos han estudiado teorías gauge no-abelianas. En 1967 Steven Weinberg, ahora en la Universidad de Texas en Austin, Abdus Salam, del Centro Internacional de Física Teórica de Trieste, y John C. Ward, hoy en la Universidad de Macquarie en Nueva Gales del Sur, aplicaron varios avances importantes desarrollados por Peter Higgs, de la Universidad de Edimburgo, Sheldon Lee Glashow, de la Universidad de Harvard, y otros a la demostración de que una teoría gauge noabeliana era capaz de unificar la fuerza electromagnética con la fuerza nuclear débil. Algunas predicciones de la teoría, denominada teoría electrodébil, recibieron confirmación experimental a comienzos de la década de los setenta, pero la prueba más espectacular se encontró en 1983 en el CERN, el laboratorio europeo de física de partículas. En ese año, se descubrieron tres partículas, los bosones vectoriales W^+, W^- y Z^0, que portaban exactamente las masas predichas por la teoría electrodébil.

El éxito de la teoría electrodébil condujo a los físicos teóricos a proponer otra teoría gauge no-abeliana, la llamada cromodinámica cuántica, que puede describir la fuerza nuclear fuerte. En esta teoría, el protón y el neutrón están constituidos por unas partículas fundamentales, llamadas quarks. La fuerza fuerte surge de las interacciones entre los quarks y ocho bosones vectoriales llamados gluones. También la cromodinámica cuántica parece estar confirmada experimentalmente.

Aunque la teoría electrodébil y la cromodinámica cuántica son teorías de aforo bastante distintas, las tres fuerzas que describen pueden unificarse ulteriormente introduciendo ambas componentes en una única teoría gauge no-abeliana, basada en un grupo de simetría mayor. Tales teorías se llaman teorías de gran unificación. Sus predicciones no han gozado todavía de confirmación experimental, pero las ideas son tan atractivas que muchos físicos piensan que alguna versión de las teorías de gran unificación dará con la explicación unificada de las interacciones fuerte, débil y electromagnética.

En las teorías de gran unificación falta la fuerza de la gravedad. Por tanto, es natural preguntarse si las teorías de gran unificación pueden unirse a la gravitación en una teoría de Kaluza-Klein en dimensiones más altas. La teoría original de Kaluza requería cinco dimensiones porque incluía sólo un bosón vectorial; esto es, el fotón asociado con la fuerza electromagnética. La fuerza nuclear débil necesita los tres bosones vectoriales recientemente descubiertos; la fuerza nuclear fuerte, los ocho gluones; la gran unificación, entre 10 y 500 bosones vectoriales adicionales. El número exacto de bosones vectoriales adicionales depende de qué versión de la teoría de gran unificación se considere.

Teorías modernas de Kaluza-Klein

Si bien no hay correspondencia uno a uno entre el número de bosones vectoriales necesarios y el número de dimensiones, se cumple bastante que, a mayor número de bosones vectoriales, más alto debe ser el número de dimensiones del espacio-tiempo. Por tanto, la inclusión de las interacciones fuertes y débiles en el marco de Kaluza-Klein exigiría un espacio-tiempo de más de cinco dimensiones. Las dimensiones adicionales podrían tener una realidad física aún no observada si se arrollan en una "superficie" multidimensional, análoga al círculo de la teoría de Kaluza o a la superficie de la esfera.

Los esfuerzos recientes por incluir las interacciones fuertes y débiles en una teoría de Kaluza-Klein comenzaron con el trabajo de Bryce S. DeWitt, de la Universidad de Texas en Austin, Y. M. Cho, de la Universidad Nacional de Seúl, Peter G. O. Freund y Mark A. Rubin, de la Universidad de Chicago, Eugene Cremmer, Bernard Julia y Joel Scherk, de la Universidad de París, y John H. Schwarz, del Instituto de Tecnología de California.

El primer problema de las teorías modernas de Kaluza-Klein estriba en el número de dimensiones adicionales que deben contener. Puesto que aún no hay unanimidad acerca de qué versión de las teorías unificadas es la correcta, queda por decidir el número de bosones vectoriales. Por tanto, el número de dimensiones adicionales necesarias en una teoría de Kaluza-Klein es, a la vez, incierto y arbitrario.

Hay un segundo problema: explicar las partículas elementales observadas. En las teorías cuánticas como las gauge no-abelianas se consideran dos clases de partículas elementales, los bosones y los fermiones. Nos hemos ocupado de los bosones, que son portadores de las fuerzas fundamentales. Desde el punto de vista mecánico-cuántico, la fuerza de la gravedad está causada por el continuo intercambio de unos bosones, llamados gravitones, entre dos cuerpos con masa. El resultado del intercambio se aprecia en el laboratorio como una fuerza de atracción entre los dos cuerpos. No hay ninguna dificultad en obtener los bosones de una teoría de

Kaluza-Klein. El campo gravitacional en dimensiones superiores puede conducir fácilmente a bosones en un mundo tetradimensional.

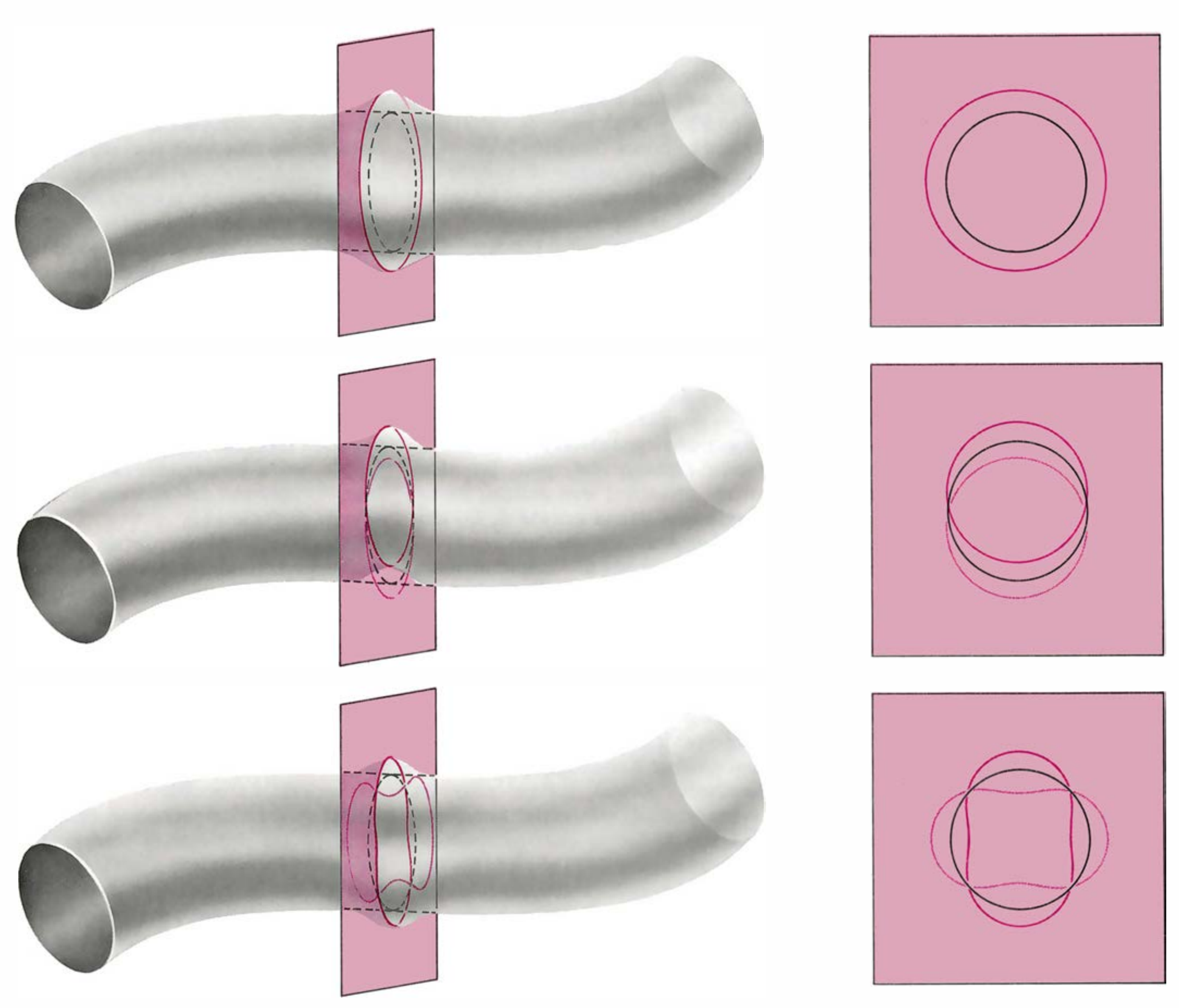
A los fermiones, que constituyen la segunda clase de partículas elementales, cumple desarrollar un papel totalmente distinto en física. A diferencia de los bosones, que transmiten las fuerzas, los fermiones constituirán la materia del universo. El electrón, el neutrón, el protón y el neutrino son fermiones. También los quarks que constituyen el protón y el neutrón son fermiones.

¿Cómo pueden explicarse los fermiones en una teoría de Kaluza-Klein? No pueden obtenerse de un campo gravitacional bosónico. La única forma de deducirlos es añadiendo uno o más campos fermiónicos a la teoría con más dimensiones. Estos campos conducirían entonces a los fermiones observados en cuatro dimensiones. El número de campos fermiónicos incluidos en la teoría es arbitrario; no existe ningún principio teórico en que basar esa cifra.

Supergravedad

Hay varios estudios interesantes en torno a las teorías de Kaluza-Klein en un número arbitrario de dimensiones para las cuales se añaden "a voleo" los campos fermiónicos. Esta arbitrariedad, sin embargo, se aparta de la simplicidad de la idea original de Kaluza. Sería de desear construir una teoría en la que el número de campos fermiónicos y el número de dimensiones vinieran determinados, forzosamente, por la estructura de la teoría.

La supergravedad es esta teoría. En primer lugar constituye una extensión de la relatividad general donde bosones y fermiones son tratados en pie de igualdad. El gravitón bosónico, por ejemplo, tiene un compañero fermióni-



6. LAS PARTICULAS pueden asociarse con la quinta dimensión circular y arrollada de la teoría de Kaluza. De acuerdo con la mecánica cuántica, cada partícula puede entenderse también como una onda. Si algún múltiplo entero de la longitud de onda encaja alrededor de la circunferencia del círculo de la quinta dimensión, la partícula correspondiente a esta longitud de onda debería existir en el espacio-tiempo tetradimensional. La primera clase de onda que se ajusta al círculo es de amplitud constante a lo largo de la circunferencia. Si el espacio-tiempo ordinario curvado se representa como una línea curva, el espacio-tiempo de mayor dimensión generado por la línea curva y la quinta dimensión circular será un cilindro curvo. La onda de amplitud constante aparece como un ensanchamiento del cilindro (*arriba*); su sección recta viene dada a la derecha y arriba. La partícula correspondiente a esta onda no tiene masa en la teoría de Kaluza. La segunda clase de onda oscila una sola vez a lo largo del círculo. Aparece también como una deformación; su sección recta es un coseno representado a lo largo del círculo como si éste fuera el eje horizontal de la gráfica (*en medio*). La figura cerrada formada por la onda se representa con la curva de color oscuro. La figura precesiona, o gira, alrededor del círculo, y una de sus orientaciones subsiguientes se ilustra con una curva de color pálido. La teoría de Kaluza predice que la partícula asociada a esta onda pesa 10^{16} veces la masa del protón. La tercera clase de onda y siguientes dividen el círculo en dos, tres o más partes iguales. La tercera clase es una onda coseno cuya longitud se ajusta dos veces alrededor del círculo (*abajo*); precesiona según se ilustra. La partícula asociada con la tercera onda es dos veces más pesada que la partícula asociada con la segunda onda.

co llamado gravitino. En la versión de Einstein de la relatividad general se pueden añadir o eliminar fermiones a capricho, pero en supergravedad a cada bosón le corresponde un compañero fermiónico. Por tanto, en supergravedad los fermiones necesarios para describir la estructura de la materia están presentes en la teoría desde su inicio.

El número de dimensiones en supergravedad está también limitado. Como se expuso antes, las teorías de supergravedad pierden quizá vigencia en dimensiones mayores que 11. Allende ese número, las condiciones matemáticas para una correspondencia entre campos bosónicos y fermiónicos no se pueden satisfacer. Más aún, Edward Witten, de la Universidad de Princeton, demostró que deben añadirse, por lo menos, siete dimensiones ocultas a las cuatro del espacio-tiempo, si se habla de incorporar las interacciones fuerte, débil y electromagnética en el marco de Kaluza-Klein. Hay una tercera característica de la supergravedad en 11 dimensiones que es circunstancial, aunque de enorme atracción para los teóricos. En todas las dimensiones menores que 11 hay versiones de la supergravedad que son matemáticamente distintas, pero en 11 dimensiones la teoría es única.

Entre los ingredientes mínimos de la teoría de Kaluza-Klein se incluirá el campo gravitacional, que da origen a los bosones, y un campo fermiónico, que explica los fermiones de nuestro mundo. Habrá también, por lo menos, un campo bosónico además del campo gravitacional, que es el causante de la compactación, o arrollamiento, de las dimensiones adicionales ocultas. Resaltémoslo, la versión de la supergravedad en 11 dimensiones contiene los tres ingredientes.

Compactación

Mayor sorpresa encierra para el teórico que el campo bosónico adicional conduzca de forma natural a sólo dos tipos de compactación. En un tipo, siete de las 11 dimensiones se arrollan en una estructura pequeña oculta: tal compactación explicaría por qué el número de dimensiones fácilmente observables en el mundo es cuatro. La otra alternativa es que sólo se arrollaran cuatro dimensiones; y esto conduciría a un mundo de siete dimensiones. Nuevas generaciones de físicos quizá descubran por qué se ha preferido un mundo tetradimensional.

Para desarrollar una teoría de Kaluza-Klein fundada en la supergravedad en 11 dimensiones se deben primero resolver las ecuaciones de la supergravedad. Muchas soluciones originan una estructura del espacio-tiempo engendrada por un espacio-tiempo tetradimensional y una superficie cerrada y pequeña de siete dimensiones. Se estudia luego el grupo de simetría de cada superficie correspondiente a la solución de las ecuaciones; el grupo de simetría determina la teoría gauge no-abeliana que debe unificarse con la gravedad. Distintas superficies cerradas tienen grupos de simetría distintos; cada uno de ellos determina una teoría de gran unificación diferente para las fuerzas distintas de la gravedad.

El paso final en el desarrollo de una teoría de Kaluza-Klein consiste en analizar las complicadas estructuras de ondas estacionarias permitidas por las superficies cerradas. Estas estructuras determinan las masas y otras propiedades de las partículas predichas por la teoría en el espacio-tiempo tetradimensional ordinario. Cada superficie heptadimensional que aparece como solución de las ecuaciones de la supergravedad debe analizarse de esta forma

Resultados teóricos

Los investigadores han concentrado sus esfuerzos en dos casos. En el primero, las dimensiones arrolladas dan origen a la estructura más simple y simétrica que es posible en siete dimensiones, es decir, el análogo heptadimensional de la esfera. Gran parte del trabajo realizado en torno a la esfera de siete dimensiones hay que agradecérselo a Michael J. Duff y Christofer N. Pope, del Colegio Imperial de Londres, François Englert, de Bruselas, Bernard de Witt, de Utrecht, y Hermann Nicolai, del CERN.

Constituye el segundo caso un conjunto de superficies que tienen el grupo de simetrías necesario para las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas. Estas superficies han sido estudiadas por Witten, Leonardo Castellani, Ricardo d'Auria y Pietro Fré, de la Universidad de Turín, y por varios más.

Por desgracia, los resultados de los estudios no predicen ningún mundo tetradimensional que se parezca al que conocemos. Se plantean tres problemas principales. El primero es el problema de la quiralidad, porque se refiere al carácter levógiro o dextrógiro de los fermiones predichos por la teoría. La quiralidad de un fermión viene determinada por el sentido de su espín mecánico-cuántico con respecto a su dirección de movimiento. Cuantas estructuras de 11 dimensiones se han estudiado predicen un número idéntico de neutrones levógiros y dextrógiros. Ahora bien, los neutrinos que se observan en la naturaleza son siempre levógiros; no parece que existan neutrinos dextrógiros.

El segundo es el llamado problema cosmológico. Guarda relación con la curvatura predicha para el espacio-tiempo tetradimensional ordinario. Si se admite la hipótesis razonable según la cual las siete dimensiones adicionales forman una estructura compacta cuya pequeñez no ha permitido todavía su observación, entonces las cuatro dimensiones restantes del espacio-tiempo adquieren una gran curvatura. Las observaciones astronómicas sugieren, por el contrario, que la curvatura del universo en gran escala es cero o casi cero. En teorías de Kaluza-Klein que no están basadas en la supergravedad el problema puede evitarse. Se puede añadir a las ecuaciones una constante, la llamada constante cosmológica, que tiene por efecto cancelar la curvatura del espacio-tiempo tetradimensional, incluso cuando las otras siete dimensiones sean muy compactas. Esta libertad de ajustar las ecuaciones subyacentes no existe en la supergravedad en 11 dimensiones.

El tercer problema para la supergravedad en 11 dimensiones es el denominado problema cuántico; hay esperanza, sin embargo, en que su resolución eliminaría también los dos problemas anteriores. Las teorías subyacentes al problema de Kaluza-Klein se apoyan en ecuaciones mecánico-cuánticas; estas ecuaciones conducen a cantidades infinitas que no tienen interpretación física obvia. Las cantidades infinitas presentan una dificultad general para la inmensa mayoría de las teorías cuánticas de la gravedad. A fin de evitarlas, los teóricos se han visto obligados a hacer aproximaciones que desprecian algunos efectos cuánticos. Y con el tiempo se puede esperar probar que los infinitos se deban a los procedimientos aproximados y no sean intrínsecos a la teoría o bien encontrar una teoría especial en la que no haya infinitos.

En los últimos meses algunos físicos teóricos se han entusiasmado con la perspectiva de que el problema de las cantidades infinitas, y posiblemente los otros problemas que hemos mencionado, hallen solución a través de la teoría de la supercuerda. Este tipo de teorías poseen algunas de las atractivas características de la supergravedad. Para ser matemáticamente consistentes han de construirse en un espacio-tiempo decadimensional; y lo cierto es que en 10 dimensiones hay muy pocas teorías po-

sibles. Desde hace algún tiempo se sabe que no aparecen cantidades infinitas en la teoría de supercuerdas en el primer nivel de aproximación de los efectos cuánticos. Algunos físicos creen ya que las cantidades infinitas no aparecen en ningún nivel de aproximación.

Teoría de supercuerdas

En toda teoría de cuerdas, las partículas están asociadas con movimientos vibracionales de una cuerda unidimensional en el espacio pluridimensional. La mayor diferencia entre una teoría de cuerdas y una teoría de campos, la supergravedad por ejemplo, reside en la forma en que se cuenta el número de partículas predichas por ambas teorías. Si las siete dimensiones adicionales de la supergravedad de dimensión más elevada no estuvieran arrolladas en una superficie cerrada, la supergravedad en 11 dimensiones sin compactación prediría un número finito de partículas. Un número infinito de partículas aparecen en supergravedad sólo en virtud de la compactación. Así, en la teoría de Kaluza pentadimensional hay una serie infinita de partículas porque se da una serie infinita de ondas estacionarias que se ajustan al círculo de la quinta dimensión. En la teoría de supercuerdas, por otro lado, hay un número infinito de partículas incluso sin que ocurra compactación de las dimensiones adicionales. Las partículas, infinitas, de una teoría de supercuerdas se corresponden con las ondas estacionarias, infinitas, que pueden existir en una cuerda.

La mayoría de las partículas que aparecen en la teoría de supercuerdas gozan de masa extraordinaria: más de 10^{19} veces la del protón. Sin embargo, la teoría predice también la existencia de un millar de partículas sin masa. Hasta hace poco se creía que las interacciones mutuas de estas partículas equivalían a las interacciones descritas por una versión de la supergravedad en 10 dimensiones, y había dos razones para que esta versión de la supergravedad no fuera objeto de estudio intensivo. En primer lugar, no parecía que hubiera soluciones de las ecuaciones del movimiento en las que seis dimensiones del espacio se arrollaran y dejaran un espacio-tiempo tetradimensional con propiedades razonables. En segundo lugar, las propias ecuaciones pierden coherencia interna (se hacen inconsistentes) en cuanto se las interpreta en un nivel cuántico. La versión decadimensional de la supergravedad, y, en consecuencia, las interacciones mutuas entre las partículas sin masa descritas por la teoría de supercuerdas no parecían relevantes en el programa de Kaluza-Klein.

Michael Gordon, del Queen Mary College de Londres, y Schwarz acaban de demostrar que las interacciones de las partículas sin masa en la teoría de supercuerdas difieren ligeramente de las interacciones en la versión decadimensional de la supergravedad. Los efectos son sutiles, causados por las infinitas partículas pesadas que hay en la teoría de supercuerdas y que no existen en supergravedad sin compactación. Cuando se incluyen los efectos de las partículas pesadas se obtienen ecuaciones coherentes en los niveles cuánticos.

Este éxito reciente ha estimulado un renovado y vigoroso esfuerzo en la compactación de las seis dimensiones adicionales en la teoría de supercuerdas. En muchos aspectos el problema se torna aún más difícil que en la supergravedad en 11 dimensiones. Las propiedades de las superficies hexadimensionales necesarias en la teoría de supercuerdas revisten mayor complejidad matemática que las propiedades de la esfera en siete dimensiones, por ejemplo. Sin embargo, hay poderosas razones para tratar de resolver el problema, así como datos de que los dos problemas de la supergravedad –el de la quiralidad y el problema cosmológico– no aparecen en teoría de supercuerdas.

Desarrollo futuro

Entre el desarrollo de ideas teóricas elegantes y la formulación precisa de predicciones que se sometan a comprobación suele transcurrir un dilatado lapso de tiempo. Trece años se tardó en encontrar la forma correcta de aplicar las teorías gauge no-abelianas a la unificación de las fuerzas fundamentales. El que no se vean hoy motivos claros de que las ideas relativas a la supergravedad y la teoría de Kaluza-Klein se plasmen en un desarrollo experimental no significa necesariamente que las ideas sean falsas. Quizá se necesita, simplemente, más trabajo teórico.

Se produce también una relación entre el desarrollo de la física fundamental y los nuevos conceptos matemáticos. Se ha podido aupar así la supergravedad hasta el nivel de refinamiento que presenta gracias a que la teoría matemática de los números que anticonmutan estaba lista para su aplicación. Puede ser que un entendimiento más profundo del papel del espacio y tiempo en la teoría cuántica exija el desarrollo y la incorporación de nuevas ideas matemáticas.

Por qué saltan las ballenas

La acción de saltar, o romper, así se la llama también, tiene que ver con los aspectos sociales de la vida de estos cetáceos. Parece intervenir en la comunicación

Hal Whitehead

Casi con toda seguridad, el salto de las ballenas es la acción más potente ejecutada por ningún animal. Se le llama rompedura, término que los balleneros de los siglos XVIII y XIX dieron a ese espectacular brinco y que los investigadores actuales del fenómeno han conservado. Dado el gran volumen y enorme peso que la ballena debe levantar al romper, cabe preguntarse por qué lo hace.

La rompedura constituye la única oportunidad que la mayoría de observadores humanos tienen de ver una ballena entera, y ha inspirado gran variedad de impresiones. Así, J. N. Reynolds, que en 1839 relataba para los lectores de *The Knickerbocker* las aventuras de los balleneros del Pacífico, escribió: "A veces, un cuerpo enorme, informe, salía contoneándose de su propio elemento, cayendo de nuevo al agua con un colosal estruendo: el esfuerzo constituía una caricatura de agilidad casi tan ridícula como la que daría un obeso regidor ejecutando un *Highland fling* [baile escocés muy movido]". Para Herman Melville, la rompedura era sublime; lo confiesa en *Moby Dick*: "Elevándose desde las más lejanas profundidades a máxima velocidad, el cachalote impulsa con un estampido toda su masa en el elemento puro del aire; amontonando una deslumbrante montaña de espuma, indica su posición hasta distancias de siete millas y más. En esos momentos, las olas rotas y rabiosas que levanta parecen su melena".

Los balleneros de siglos pasados, que buscaban su presa en lentos buques de vela, tenían muchas oportunidades de observar a los cetáceos que intentaban capturar. Durante años, las anécdotas que esos hombres contaban formaron la base de lo que se sabía de las rompeduras y de otros tipos de comportamiento de los cetáceos. Entre las explicaciones que proponían para el salto, de manera un tanto antropomórfica, figuraban la alimentación, el acto de desperezarse, la diversión, la persecución por parte de peces espada y un "acto de desafío", que presumiblemente se dirigía a los balleneros.

En los últimos años, las observaciones científicas de cetáceos en alta mar han empezado a arrojar datos cuantitativos útiles sobre muchos aspectos de su comportamiento, incluida la rompedura. Roger Payne, de la rama estadounidense de la Fundación Mundial para la Vida Salvaje, y sus colegas han contribuido con muchos resultados a lo largo de su prolongado estudio de las ballenas francas australes (*Eubalaena australis*) en aguas de la península de Valdés, Argentina. Otros estudios importantes incluyen las investigaciones de la ballena gris (*Eschrichtius robustus*) en aguas de Baja California, realizados por Kenneth S. Norris, de la Universidad de California en Santa Cruz, y varios otros investigadores, así como observaciones de ballenas jorobadas o yubartas (*Megaptera novaeangliae*) en aguas de Hawai, por James D. Darling, de la Universidad de California en Santa Cruz, Peter Tyack, de la Institución Oceanográfica de Woods Hole, y otros. Mis propias investigaciones se han centrado sobre todo en las yubartas que se encuentra en aguas del Atlántico Norte occidental, en aguas de Terranova durante el verano y en Silver Bank, en las Antillas, durante el invierno.

Tales observaciones durante períodos prolongados son cruciales para la comprensión del salto, pues el fenómeno no es frecuente. Raramente se ve saltar a las ballenas, de ahí que suela tomar muchos años la observación de un número incluso moderado de rompeduras. A este respecto, la investigación en Silver Bank fue particularmente importante. Las ballenas jorobadas del Atlántico Norte occidental se congregan allí durante los meses de invierno para aparearse y parir. Alcanzan una densidad que se acerca a una ballena por kilómetro cuadrado. Muchas de ellas rompen. Durante nuestros transectos de unos 200 kilómetros a través del banco con el fin de estimar el tamaño de la población, vimos saltos en cerca del 20 por ciento de los cardúmenes avistados (que por lo general contienen de una a cuatro ballenas).

Un salto de yubarta supone el levantamiento de tanta biomasa como la de 485 personas que pesaran por término medio 68 kilogramos cada una. Las mayores yubartas alcanzan una longitud que se acerca a los 15 metros, y un peso de 33 toneladas métricas.

Las rompeduras de la yubarta y de otras ballenas de las que se sabe que rompen van desde un salto completo enteramente por fuera del agua hasta una pausada onda en la que sólo emerge la mitad del cuerpo. En más de una cuarta parte de las rompeduras de yubarta, al menos el 70 por ciento del animal sale fuera del agua, pero es raro ver la ballena entera sobre la superficie. Las yubartas rompen a todos los ángulos, hasta los 70 grados con respecto a la superficie del agua.

Payne ha observado el proceso de rompedura mientras vigilaba ballenas francas australes desde acantilados o avionetas. La ballena nada horizontalmente hasta que ha conseguido suficiente velocidad. Después, inclina su cabeza hacia arriba y levanta su aleta caudal, o cola. Estas acciones convierten el impulso horizontal en impulso vertical y la ballena emerge del agua. Puesto que el acercamiento es horizontal, una ballena puede romper en agua que sólo tiene unos pocos metros de profundidad.

Los cetáceos realizan otras acciones que, en cierto modo, parecen rompeduras. Una de ellas es la de embestir. En esta maniobra la ballena hace salir de la superficie no más del 40 por ciento de su cuerpo. Una embestida puede ejecutarse horizontalmente, verticalmente o en cualquier ángulo entre estos dos extremos. La ballena puede orientarse de modo que su superficie dorsal, o bien la ventral, sea la que esté arriba,

o bien embiste de lado. Con frecuencia se ve a las ballenas cerrar sus mandíbulas mientras embisten, a veces ingiriendo una buchada de plancton o pequeños peces. Por ello suele considerarse que el embestir está asociado con la alimentación. Sin embargo, puede verse a las yubartas embestir cuando intentan adelantarse unas a otras en grandes grupos, por ejemplo cuando de dos a 10 machos compiten entre ellos por el acceso a una hembra. Así, la embestida ocurre cuando una ballena rompe, no intencionadamente, la superficie del agua al ejecutar una maniobra por debajo de la superficie del agua. Una rompedura, en cambio, parece tener finalidad por sí misma.

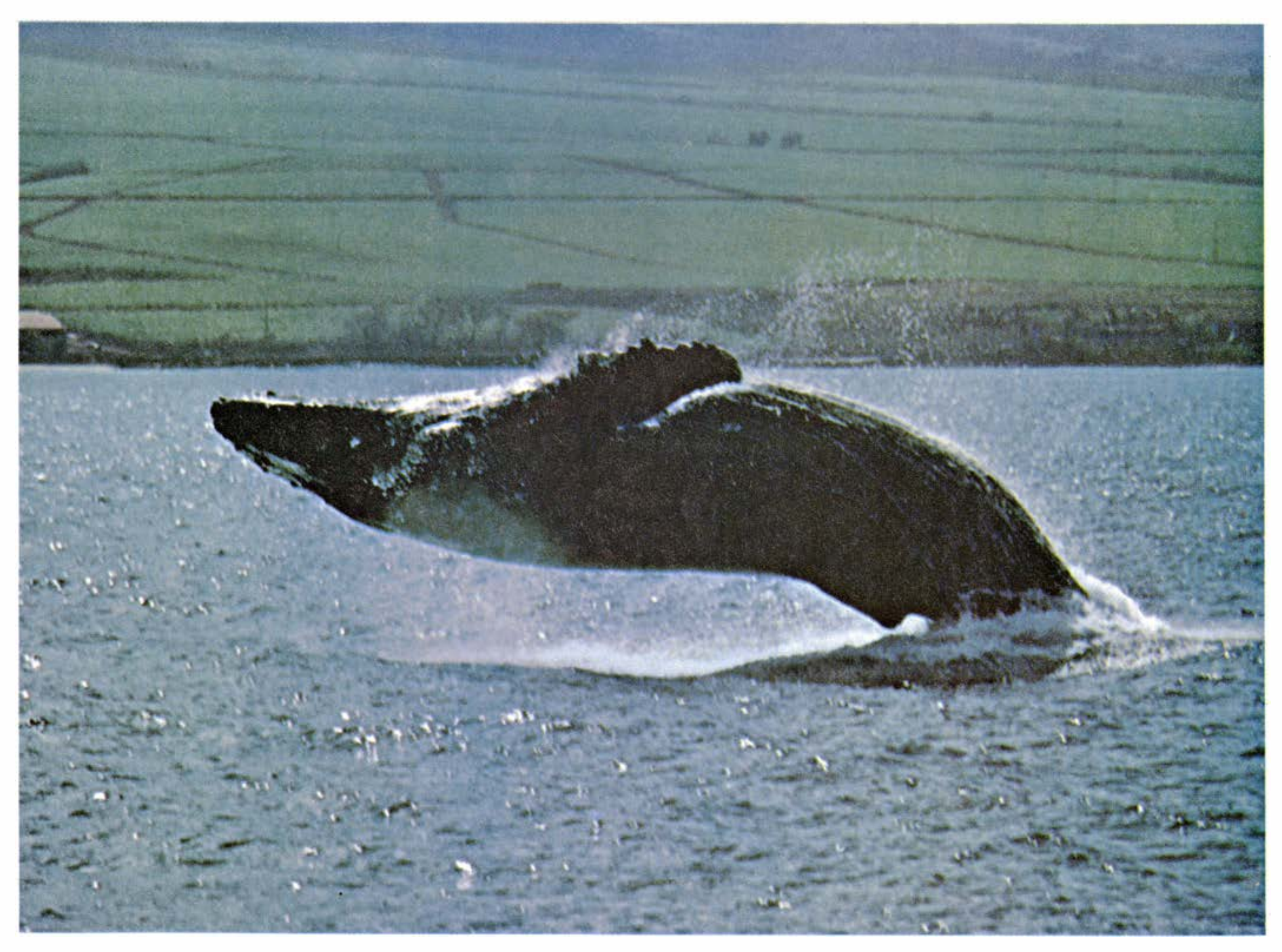
Otra actividad en la que determinados animales acuáticos saltan intencionadamente sobre la superficie es el delfineo: el animal realiza una serie de saltos horizontales mientras se desplaza rápidamente. Robert W. Blake, de la Universidad de Columbia Británica, ha calculado que, al ejecutar esos saltos, una ballena pequeña o un delfín minimizan la resistencia por fricción. También ha demostrado que las ballenas grandes no se beneficiarían de igual modo si realizaran esos saltos continuados, y, de hecho, no he visto nunca que las yubartas los efectúen.

Las rompeduras se dividen de modo natural en dos tipos, que yo llamo desplome de vientre y rompeduras verdaderas. En el desplome de vientre la ballena permanece con el dorso hacia arriba durante todo el salto y cae sobre su vientre. En una rompedura verdadera el animal emerge del agua sobre su costado, gira mientras sacude las aletas y cae sobre su dorso. Un 80 por ciento de las rompeduras de las yubartas son verdaderas; alrededor del 20 por ciento son desplomes de vientre.

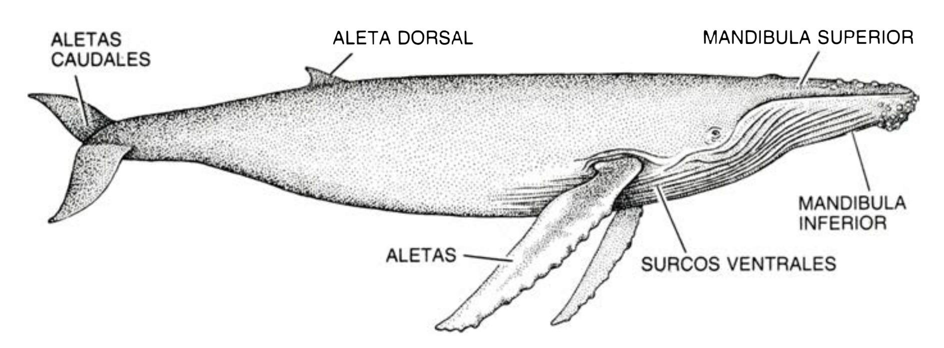
Es más probable ver soplar, o exhalar, a una ballena que se desploma de vientre que a una que efectúa una rompedura verdadera. Payne ha sugerido que el desplome de vientre puede ser tan doloroso para los cetáceos como lo es para las personas. Sin embargo, deja el espiráculo por fuera del agua durante más tiempo que el desplome verdadero. Por ello, pudiera preferirlo la ballena cuando ésta desea respirar durante el salto.

Con frecuencia las rompeduras se ejecutan de manera secuencial. Una determinada ballena puede romper cada 40 segundos, aproximadamente, durante unos pocos minutos. En los cardúmenes de yubartas del Atlántico Norte occidental, la duración de la secuencia media era de 9,4 rompeduras. (La media comprende casos en los que la secuencia sólo comprendía una rompedura.) Normalmente, todas las rompeduras parecían estar ejecutadas por un mismo animal. Observamos en Silver Bank una secuencia de 130 rompeduras en 75 minutos, probablemente todas ejecutadas por el mismo animal.

Dentro de una secuencia, la tendencia es que a un desplome de vientre le sigue otro, y a una rompedura verdadera le sucede otra. Tanto en las yubartas como en las ballenas francas, un animal que rompe tiende a levantar sucesivamente cada vez menos parte de su cuerpo fuera del agua a medida que la secuencia progresa. Como podría espe-



1. BALLENA ROMPIENDO, fotografiada en el océano Pacífico, cerca de Hawai. La ballena, una yubarta (*Megaptera novaeangliae*), efectuaba una rompedura verdadera, en la que el animal emerge del agua sobre el costado, gira en el aire y cae al agua sobre su dorso. El otro tipo de rompedura, que se realiza con mucha menos frecuencia, es un desplome de vientre. La mayoría de saltos observados (casi el 80 por ciento) son rompeduras verdaderas.



2. BALLENA JOROBADA, xibarte o yubarta, sujeto de la mayoría de observaciones del autor sobre el salto en cetáceos. Las yubartas que el autor y sus colegas estudiaron pasan el verano en aguas de Terranova y el invierno en Silver Bank, en las Antillas. Las interacciones sociales entre las yubartas se producen probablemente en invierno, estación en la que con mayor intensidad se aparean y paren.

ROMPEDURA VERDADERA

DESPLOME DE VIENTRE

3. ROMPEDURA VERDADERA Y DESPLOME DE VIENTRE se inician cuando la ballena emerge del agua en cualquier ángulo, hasta 70 grados con respecto a la superficie. El animal cae sobre el dorso o el vientre, respectivamente, como se ilustra en estos dos dibujos. Con frecuencia, en un desplome de vientre la ballena sopla, o exhala, lo que sugiere que el desplome de vientre, que se realiza a intervalos irregulares e infrecuentes, puede ser el tipo de salto elegido cuando el animal desea respirar. Durante este tipo de salto, el espiráculo permanece más tiempo fuera del agua que en la rompedura verdadera.

rarse en tales circunstancias, parece que la ballena se va fatigando.

¿Cuánta energía consume una ballena al efectuar una rompedura, y cuánta potencia está desarrollando cuando abandona la superficie? Con mediciones obtenidas a partir de fotografías de ballenas en trance de romper, he simulado el proceso de rompedura en un pequeño ordenador. En una rompedura completa, en la que la mayor parte del animal abandona la superficie del agua en un ángulo de unos 35 grados, una yubarta adulta de 12 metros emerge en superficie a una velocidad de unos 15 nudos (27 kilómetros por hora). Puesto que ésta es casi la máxima velocidad que un animal puede alcanzar, una rompedura completa representa el uso extremo de la potencia propulsora de una ballena jorobada.

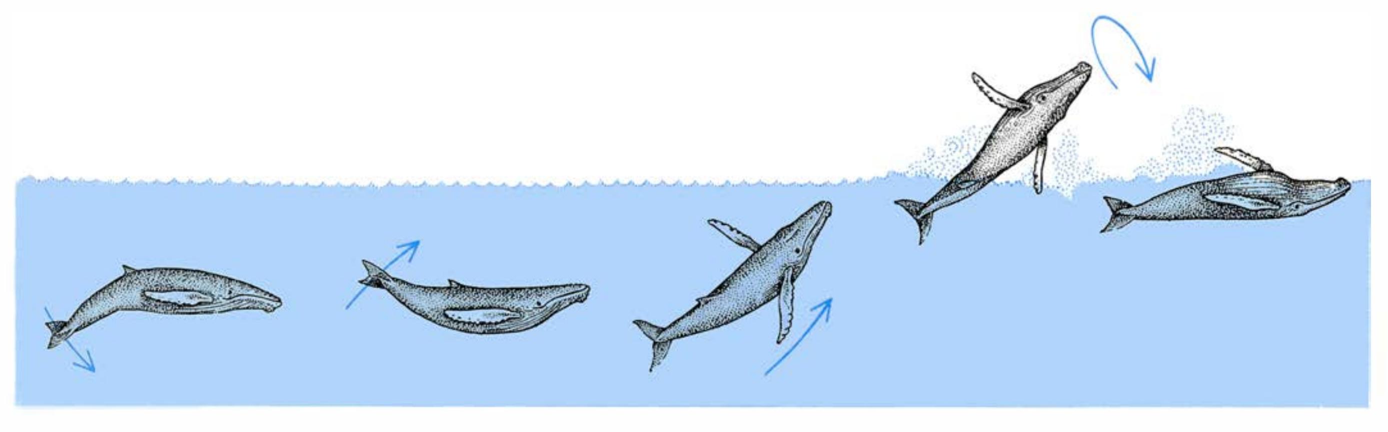
La energía necesaria para realizar tal rompedura es de aproximadamente 2500 kilocalorías. La tasa metabólica en reposo de la ballena es de unas 300.000 kilocalorías al día. De ahí que la energía que se consume en una rompedura sea algo menos que la centésima parte de las necesidades calóricas mínimas diarias del animal. Esta energía supone del orden de los 2,6 kilogramos de capelanes (*Mallotus villosus*), la presa principal de la dieta de la yubarta. (Las yubartas suelen cazar capelanes en tragos de 100 kilogramos.) Una rompedura, por tanto, no es un acontecimiento particularmente significativo del presupuesto energético diario de un cetáceo. Sin embargo, una secuencia de 20 rompeduras o más consume gran cantidad de energía. No es sorprendente que las rompeduras sucesivas sean cada vez más débiles.

Resulta menos fácil decir por qué rompen las ballenas. El estudio del comportamiento de las grandes ballenas se ha comparado a la astronomía. El observador atisba los sujetos de su estudio, con frecuencia a gran distancia; no puede realizar experimentos, y debe intentar inferir a partir de datos que suelen ser inadecuados. Bajo condiciones de este tipo, una manera de investigar la función de una actividad es examinar su contexto.

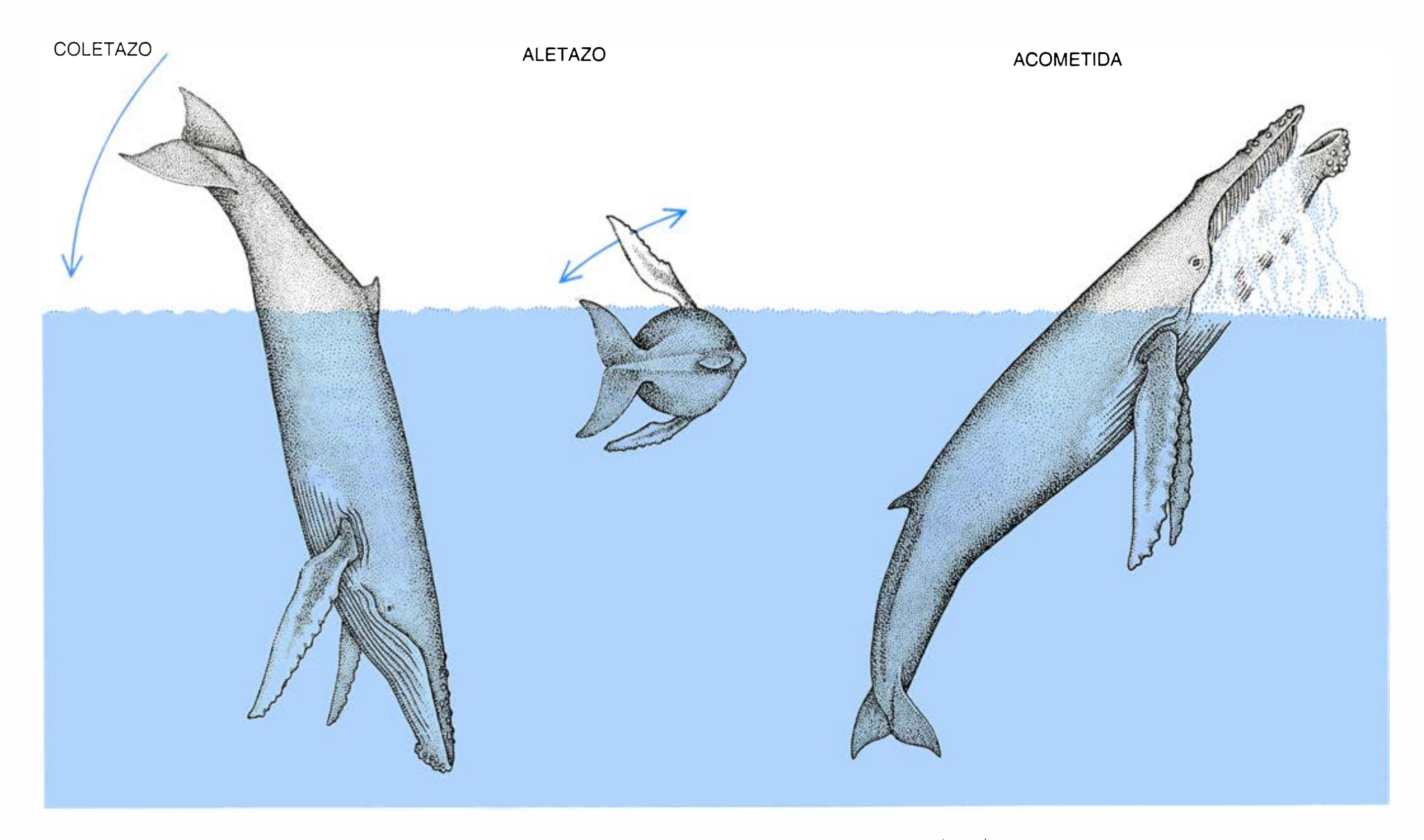
He pasado cientos de horas en pequeños botes a vela siguiendo grupos de yubartas a lo largo de sus rutinas diarias. Este trabajo, junto con las observaciones de Payne y otros, está dando una imagen bastante clara de las circunstancias en las que las ballenas rompen. No está produciendo una serie de reglas invariables sobre las rompeduras; esta seguridad no es común en el estudio del comportamiento de anima-

les avanzados. Lo mejor que puede hacerse es ofrecer tendencias significativas desde el punto de vista estadístico. Lo que sugieren es que el romper está asociado principalmente con la interacción social entre ballenas, quizá con la comunicación y (entre las ballenas jóvenes) con el juego.

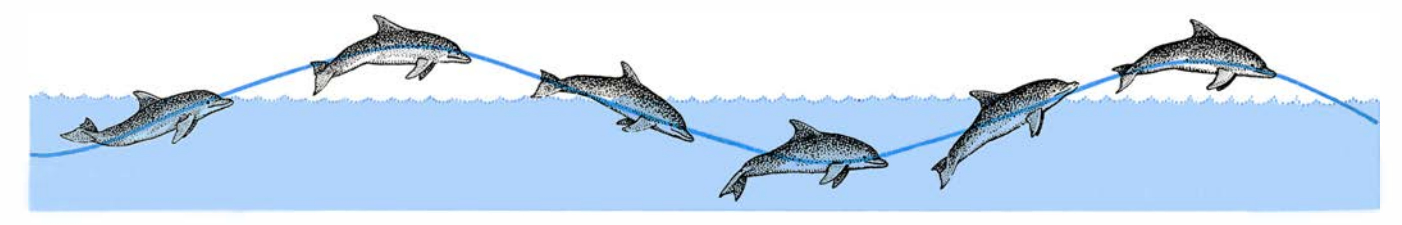
Con frecuencia las ballenas rompen cuando una manada que contiene dos o más yubartas se divide en dos grupos, o cuando dos manadas (que a veces están constituidas por una única ballena cada una) se unen. Asimismo, a menudo se produce una rompedura durante los 15 minutos que siguen a un coletazo, es decir, un batimiento de la cola del cetáceo sobre la superficie del agua. De forma similar, puede asociarse con un aletazo (movimiento de una aleta en el que se la levanta sobre el agua y se golpea la superficie) y con otras demostraciones. Christopher W. Clark, de la Universidad Rockefeller, y Payne han



4. UN SALTO O ROMPEDURA se inicia cuando la ballena, nadando más o menos en paralelo a la superficie, va ganando velocidad. Levanta su aleta caudal e inclina la cabeza hacia arriba, cambiando el impulso horizontal en impulso vertical. Esta ballena está empezando una rompedura verdadera.



5. ACTIVIDADES RELACIONADAS CON EL ROMPER. Incluyen el coletazo, en el que la ballena golpea con su cola la superficie del agua, y el aletazo, en el que se golpea con una aleta. Parecen tener un propósito. La embestida, que hace salir sólo parte del cuerpo fuera del agua, es, evidentemente, el resultado no intencionado de una maniobra subacuática. La rompedura suele darse dentro de los 15 minutos siguientes a un coletazo o un aletazo.



6. DELFINEO; consiste en una serie de saltos horizontales realizados cuando el animal se desplaza a gran velocidad. Para una ballena pequeña o un delfín esta acción minimiza la resistencia por fricción del agua. El delfineo no resultaría eficaz para las grandes ballenas, que, en efecto, no parecen efectuarlo.

observado pautas similares en ballenas francas australes.

Es notable, y aparentemente contradictorio, que las yubartas rompan menos en verano, aun cuando entonces los grupos se dividen y se fusionan con más frecuencia que en invierno. Sin embargo, el apareamiento y el parto tienen lugar en invierno, y estas interacciones sociales son probablemente más importantes que las estivales. De ahí que las tasas de rompeduras estén correlacionadas no sólo con el número de interacciones sociales que tienen lugar, sino también con su importancia en la vida de los cetáceos.

Una correlación adicional entre el romper y la actividad social se aprecia al considerar las tasas de rompedura en distintas especies de cetáceos. Al examinar este tema elaboré una tabla que incluye la relación entre el peso medio y el cubo de la longitud, como indicación de rotundidad, o redondez. Las especies menos rotundas parecerían menos propensas a romper, debido a su hidrodinamismo más desfavorable. Por ello, es sorprendente que las observaciones muestren que son las que rompen con más frecuencia. Las ballenas francas, las ballenas grises y las ballenas jorobadas (las tres especies rotundas mejor estudiadas) se congregan en invierno en zonas de reproducción tradicionales. Allí rara vez se alimentan; subsisten de la energía almacenada en sus gruesas capas de grasa. Las interacciones sociales son frecuentes y a veces vigorosas en estas áreas de cría, y es aquí donde se observa la mayoría de las rompeduras.

En cambio, el rorcual azul (*Balaenoptera musculus*), el rorcual franco o común (*B. physalus*) y el rorcual norteño (*B. borealis*), todos ellos esbeltos, no parecen frecuentar áreas de cría particulares, sino que permanecen dispersos durante los meses invernales. Esta estrategia probablemente reduce su gasto neto de energía, de modo que no precisan gruesas capas de grasa. Pueden emplear estentóreos sonidos de baja frecuencia o quizás un sistema social monógamo para lograr el acceso a la pareja. En cualquier caso, es probable que efectúen escasas interacciones sociales a corta distancia.

Se sabe poco de los sistemas sociales de la ballena de Groenlandia o ártica (*Balaena mysticetus*), del rorcual de Bryde (*B. edeni*) o del rorcual aliblanco o menor (*B. acutorostrata*), pero la impresión general entre los observadores es que en esos cetáceos misticetos las especies más sociales presentan las tasas de rompedura más elevadas. El cachalote (*Physeter catodon*), odontoceto que rompe a menudo, tiene un sistema social particularmente complejo.

¿Qué otros indicios surgen de las investigaciones en el contexto del salto de los cetáceos? Un hallazgo inesperado, que se ha obtenido en varios estudios independientes, es que las ballenas rompen con más frecuencia cuando la velocidad del viento aumenta. No se trata de un aumento brusco durante las tormentas, momento en el que la ballena quizá quisiera obtener aire libre de espuma, sino más bien de un aumento gradual con velocidades del viento relativamente moderadas. Payne ha especulado que los cetáceos podrían valerse de la rompedura como un medio de comunicarse mediante el sonido (a partir del golpe de la caída) cuando el ruido debido al viento y a las olas confunde sus vocalizaciones normales.

Payne hizo otro descubrimiento, que le llevó a pensar que a las rompeduras les corresponde una función de emisión de señales. Encontró que en las ballenas francas australes las rompeduras provocan rompeduras. En otras palabras, la probabilidad de que una ballena saltara aumentaba cuando las ballenas de las cercanías lo hacían. Intrigado por este hallazgo, desarrollé en algunos de nuestros transectos de Silver Bank una forma rudimentaria del procedimiento denominado análisis espectral. Los resultados sugieren que las yubartas que rompen forman grupos de unos 10 kilómetros de diámetro. Una ballena tenía mayores probabilidades de romper si se hallaba a una distancia de 10 kilómetros o menos de otras ballenas que rompían. En el apogeo de la estación, uno de esos grupos podía tener 100 yubartas, de las que de 10 a 15 se hallaban rompiendo. En buenas condiciones, cabe esperar que dichos cetáceos oigan el ruido de una rompedura a una distancia de unos cuantos kilómetros. Así, estos resultados representan un apoyo provisional a la hipótesis de Payne según la cual el romper tendría una función de señalización. Si otras ballenas ven u oyen una rompedura, la información se ha transmitido. El mensaje sería, al menos, que una ballena ha saltado.

ESPECIES	RELACION ENTRE EL PESO Y EL CUBO DE LA LONGITUD	TASA DE ROMPEDURAS
BALLENA JOROBADA O YUBARTA (*MEGAPTERA NOVAEANGLIAE*) — 15 METROS	10,6	MUY FRECUENTE
BALLENA FRANCA (*EUBALAENA AUSTRALIS*)	16,2	ROMPE CON FRECUENCIA
BALLENA GRIS (*ESCHRICHTIUS ROBUSTUS*)	14,3	ROMPE CON FRECUENCIA
CACHALOTE (MACHO/HEMBRA) (*PHYSETER CATODON*)	10,7/19,1	ROMPE CON FRECUENCIA
BALLENA ARTICA O DE GROENLANDIA (*BALAENA MYSTICETUS*)	26,7	ESPORADICA
RORCUAL DE BRYDE (*BALAENOPTERA EDENI*)	6,1	ESPORADICA
RORCUAL ALIBLANCO O MENOR (*BALAENOPTERA ACUTOROSTRATA*)	12,3	POCO USUAL
RORCUAL FRANCO O COMUN (*BALAENOPTERA PHYSALUS*)	4	RARA
RORCUAL AZUL (*BALAENOPTERA MUSCULUS*)	6,3	CASI NUNCA
RORCUAL NORTEÑO (*BALAENOPTERA BOREALIS*)	3,6	CASI NUNCA

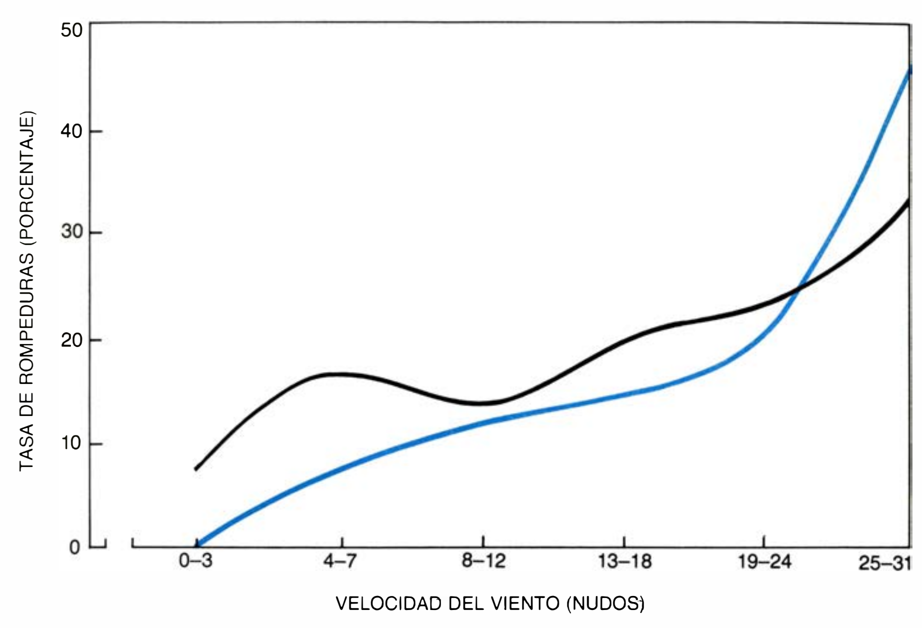
7. SALTO Y ROTUNDIDAD parecen estar directamente relacionados: cuanto más rotunda es una ballena, más probable es que rompa. La rotundidad viene indicada por la relación entre el peso medio de la ballena y el cubo de su longitud. En general, las ballenas más estilizadas son las que menos rompen, aunque el hidrodinamismo del salto parece que las favorece. Aparentemente, la correlación surge del hecho de que las especies rotundas suelen enzarzarse en el tipo de actividad social que con frecuencia se acompaña de saltos, en particular cuando se congregan en invierno en áreas de cría tradicionales. En invierno no comen mucho, y subsisten principalmente gracias a sus reservas de grasa. Las ballenas más delgadas se muestran también mucho menos sociales y probablemente se alimenten durante todo el año.

¿Constituye la rompedura un método eficaz de transmitir cualquier otro mensaje? El salto produce una visión espectacular y un sonido fuerte para observadores en la superficie, pero la mayor parte de las demás ballenas se hallan bajo la superficie del agua en el momento de una rompedura. Incluso en el agua más clara, el límite de la visión submarina es de unos 50 metros. Sin embargo, en condiciones favorables el sonido puede viajar a grandes distancias en el agua del mar. Por ello la pregunta se transforma en si una ballena puede generar sonidos más fuertes, al menos en algunos rangos de frecuencia, cuando rompe que cuando vocaliza. Se dispone de poca información sobre la intensidad del sonido subacuático que se produce en una rompedura, y no hay información disponible sobre si las ballenas intentan maximizar su producción de sonido durante un salto.

Una rompedura podría asimismo ser una exhibición cuyo propósito fuera un acto de agresión, un reto, una demostración de fuerza o una maniobra en el cortejo. La agresión parece ser un motivo poco probable. Una ballena es un animal liso y bien acolchado, de modo que es difícil imaginarse de qué forma una rompedura podría hacer un daño significativo a menos que la víctima fuera mucho menor que el rompedor. Sé de un caso en el que una yubarta cayó sobre un bote durante una serie de saltos en aguas de Terranova, pero el suceso parece haber sido un accidente y no una demostración de agresión por parte de la ballena. Tras muchos meses en el mar en pequeños botes, nunca he tenido la impresión de que ninguno de los muchos miles de rompeduras que observamos estuviera agresivamente dirigido contra nosotros. Además, es probable que un potente coletazo constituyera una agresión mucho más eficaz.

Una ballena que realiza una rompedura completa está exhibiendo su máxima potencia a cualquier ballena que se halle al alcance de la vista o del oído. Por ello el salto puede ser útil como exhibición de cortejo, desafío o demostración de fortaleza. Una hembra pudiera escoger pareja reproductora atendiendo, en parte, a la fuerza de la rompedura de ésta, o de su capacidad para mantener una fuerte producción de sonido durante una secuencia de saltos. Ese macho estaría demostrando fuerza y vigor y con ello quizás (indirectamente) eficacia genética.

Correlaciones similares pudieran hacer que una rompedura fuera útil como desafío o demostración de fuerza dirigidos a otros machos en competencia por el acceso a una hembra determinada. Con frecuencia se observan rompeduras en las ballenas francas y en las yubartas cuando los machos están enzarzados en tal competencia.



8. SALTO Y VELOCIDAD DEL VIENTO guardan una correlación positiva. Se ilustra la correlación en datos obtenidos para yubartas en 1978 (*gris*) y 1980 (*color*). Roger Payne, de la rama estadounidense de la Fundación Mundial para la Vida Salvaje, considera que el acto de romper aumenta con el viento, porque ayuda a la comunicación cuando el ruido de las olas amortigua las vocalizaciones normales.

También debe considerarse el concepto algo borroso del juego. La gente que observa a un animal que está realizando una acción sin una función inmediatamente obvia tiende a denominarla juego. En consecuencia, el concepto se ha convertido en una categoría que es un cajón de sastre para comportamientos que no son explicables de otro modo, y entre los que con frecuencia se ha incluido el romper de los cetáceos. Recientemente, el juego ha recibido una atención más seria por parte de varios biólogos y etólogos, y en la actualidad se le suele considerar una categoría de comportamiento válida, aunque difícil de definir. Si el romper es una actividad importante para las ballenas, y si la manera en que se realice influye sobre su efectividad, hay buenas razones selectivas para que los ballenatos, y posiblemente los adultos, "jueguen" a saltar.

La rompedura reúne la mayoría de las características de las otras actividades que los etólogos califican de juego: es común en contextos sociales, con frecuencia lo realizan animales jóvenes y en muchos casos no tiene funciones evidentes. Algunos investigadores han especulado que una finalidad del juego en otros animales jóvenes es ayudar al desarrollo de la musculatura; el salto podría desempeñar este papel en las jóvenes ballenas.

Las rompeduras más espectaculares las realizan las ballenas más jóvenes. Los ballenatos de la ballena franca, de la ballena gris y de la yubarta empiezan a romper cuando sólo tienen unas pocas semanas de edad. Las rompeduras suelen ser vigorosas y pueden desarrollarse en largas secuencias. En Silver Bank los ballenatos saltaban con más frecuencia que los adultos. En realidad, era más bien excepcional que los animales adultos se dedicaran regularmente a esta vigorosa actividad como una forma de juego. Por ello parece poco probable que el juego sea la principal función que le corresponde al salto en las ballenas adultas.

Los hallazgos expuestos y las hipótesis que he comentado no indican una única función clara para el salto. La evidencia sugiere que la actividad tiene varias funciones. Aunque hay fuertes correlaciones con la socialidad y las rompeduras poseen características que las harían efectivas como señales de valor físico, no hay evidencias que apoyen de forma conclusiva una u otra hipótesis.

Mi evaluación subjetiva es que el salto suele servir para acentuar otra comunicación visual o acústica. Es una especie de signo de admiración físico. Del mismo modo que las personas alzan la voz, gesticulan con las manos o se alzan y bajan para dar énfasis a una comunicación, así la ballena rompe. Y, escuchadores furtivos, los observadores humanos suelen perderse el mensaje, advirtiendo solamente sus características dominantes.

Yacimientos auríferos ibéricos en la antigüedad

Durante los primeros siglos de nuestra era el Imperio Romano removió más de 600 millones de metros cúbicos de suelo aurífero en el noroeste de la península ibérica. Se trata de la mayor obra minera acometida en la antigüedad clásica

Luis Carlos Pérez García y Fco.-Javier Sánchez-Palencia Ramos

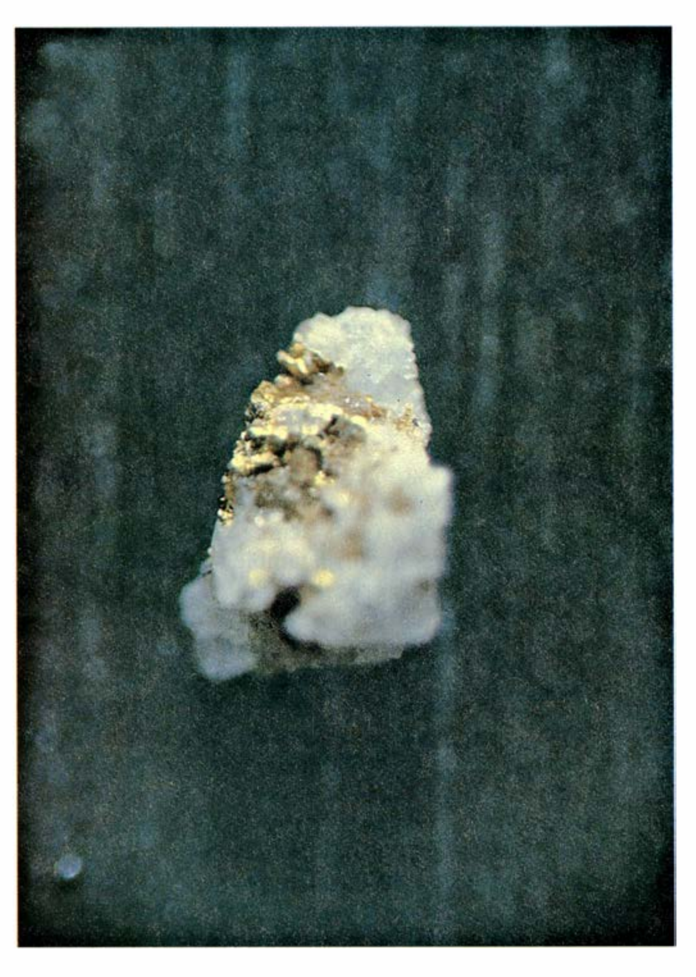
"Las montañas de las Hispanias, que por lo demás son áridas y estériles y que no producen ninguna otra cosa, por fuerza han de producir oro" (*Caius Secundus Plinius: Naturalis Historia, 33, 67*). A pesar de la fama aurífera de que ha gozado el noroeste peninsular, la región con más indicios de oro nativo de toda Europa, en la actualidad sólo se trabaja en la mina portuguesa de Jales (Tras-os-Montes), con una modesta producción de 300-400 kilogramos de oro al año. Sin embargo, en los primeros siglos de nuestra era fue la más importante productora de oro de todo el mundo entonces conocido, superando a yacimientos como los de Dacia (Rumania) y al resto de la península. La misma explotación artesanal de los placeres fluviales es casi un mero recuerdo, que se puede oír contar con cierto halo de leyenda en Asturias, León y sobre todo en Galicia. Aún viven algunas de las *aureanas* y *oureiros* que bateaban con sus *cuncos* –recipientes originariamente de madera de castaño y de forma cónica– las arenas de los ríos Miño, Xares, Bibei, Camba, Lor y, en especial, del Sil a su paso por las Valdeorras (Orense). La técnica que empleaban era la utilizada por las mujeres del pueblo galaico de los ártabros o arotebras, según nos relata el geógrafo grecorromano Estrabón: "Entre los ártabros... aflora en la tierra, según dicen, la plata, el estaño y el oro blanco, puesto que está mezclado con plata (es decir, se trata de electrum: oro aleado con plata), y aquella tierra la arrastran los ríos, y las mujeres excavándola con rastrillos la lavan con cribas entretejidas (para eliminar la ganga más gruesa) sobre unos recipientes (las bateas o cuncos de las aureanas)" (*Geografía, 3, 2, 9*). La construcción de embalses y pantanos, la emigración y la subida del nivel de vida son las causas del abandono de esta explotación artesanal.

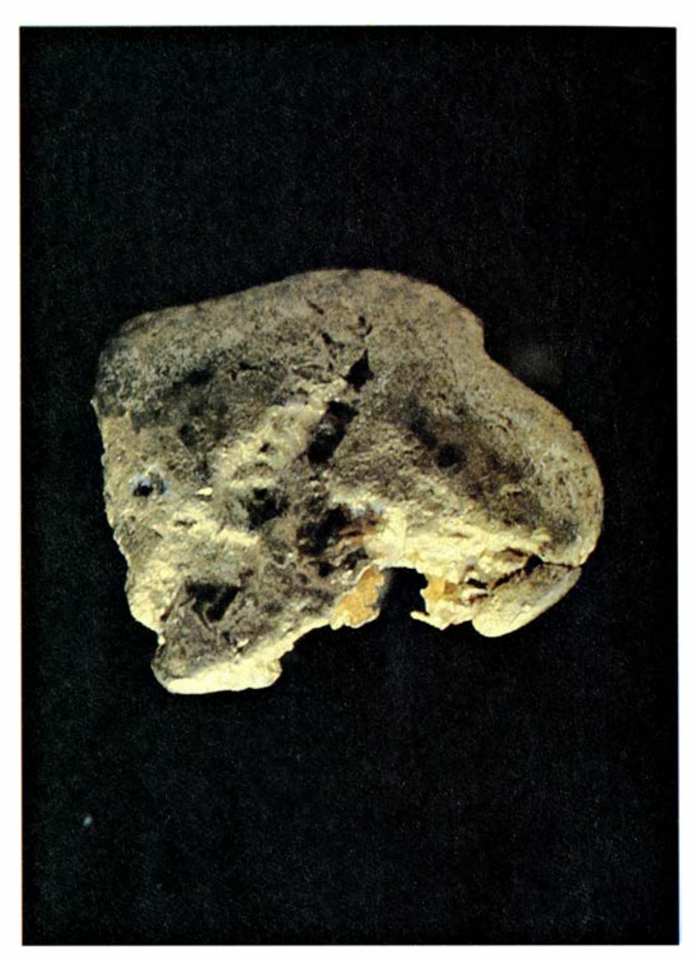
La gran industria minera llevada a cabo por el Imperio Romano en el noroeste (durante los dos primeros siglos de nuestra era) no ha podido ser emulada en ningún momento de la historia. La profusión de explotaciones, en general a cielo abierto, es tan espectacular que en algunos casos han llegado a cubrir más de 30 kilómetros casi de forma ininterrumpida. Los movimientos de tierra fueron de tal magnitud, a causa del bajo contenido de oro de los yacimientos, que hasta entrado el siglo XX constituyeron los desmontes mineros más importantes del viejo continente. Los romanos removieron más de 600 millones de metros cúbicos de material aurífero, distribuidos en cerca de 600 explotaciones más o menos complejas.

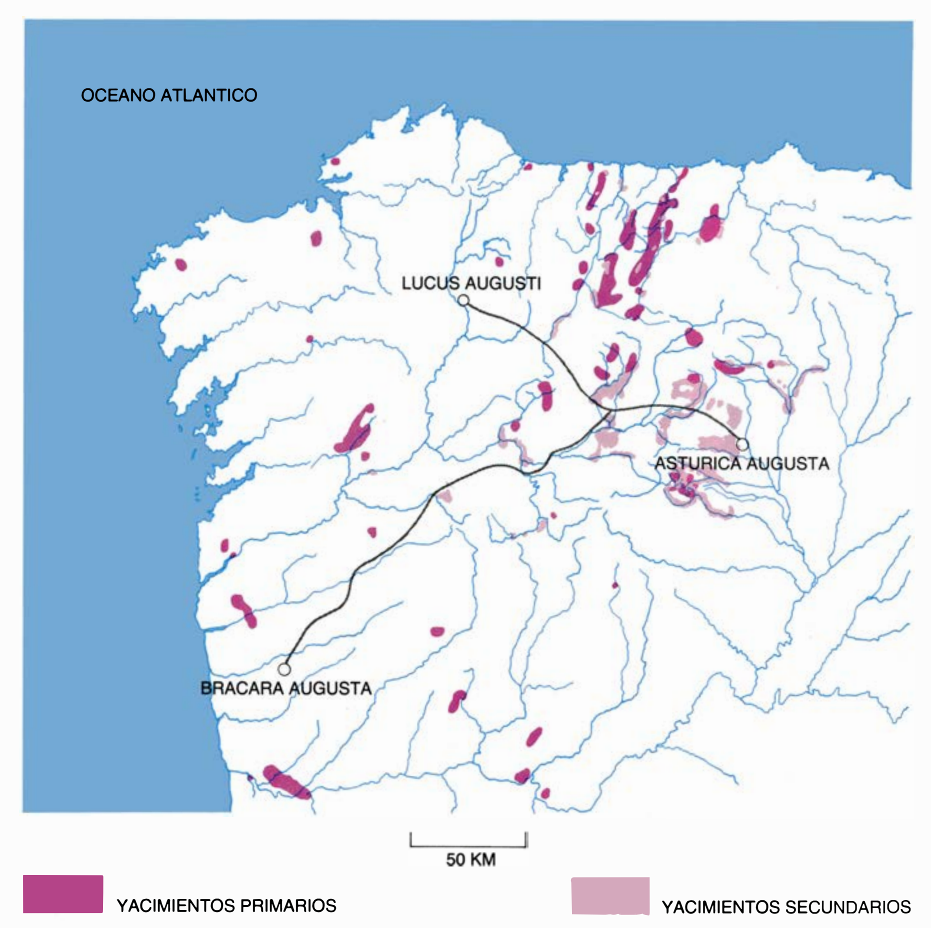
El oro se presenta en una extensa variedad de ambientes y tipos de depósitos. Dentro de los llamados yacimientos primarios podemos establecer una división entre los gallegos y los asturleoneses, que se instalan, respectivamente, en las zonas galaico-castellana y asturoccidental-leonesa del Macizo Ibérico. Los yacimientos gallegos consisten en filones de cuarzo dentro de rocas intrusivas ácidas. El oro se encuentra ligado a sulfuros de hierro y arsénico (arsenopirita). En la zona asturleonesa los sulfuros son muy accesorios y los principales yacimientos en filones de cuarzo no poseen relaciones claras con las rocas intrusivas, muy escasamente representadas, y sí en cambio con las grandes líneas de cabalgamiento hercínicas y con una litología de cuarcitas y areniscas, que es la dominante en la transición Cámbrico-Ordovícico (transcurrida 520-470 millones de años atrás), en cuyos lechos de minerales pesados también se han podido apreciar algunas partículas de oro. Salave, cerca de Tapia de Casariego, y Ablanedo, en las proximidades de Sales, ambas en Asturias, es un caso que conviene diferenciar de los anteriores: se trata de una diseminación de oro y sulfuros dentro de una roca intrusiva de quimismo ácido (granodiorita) con fuerte alteración hidrotermal.

En cuanto a los yacimientos secundarios o derivados de los anteriores, entran a formar parte los conglomerados de las facies proximales de abanicos aluviales del Oligoceno y del Mioceno, sobre todo estos últimos, que alcanzan un desarrollo muy importante en la depresión del Bierzo y en la cuenca del Duero. Estas series detríticas rojas fueron extensamente trabajadas por los romanos, principalmente en el contacto con el lecho rocoso paleozoico. El clima bajo el cual se depositaron era cálido-húmedo estacional, tipo monzónico. Los agentes de sedimentación fueron las corrientes de agua, que estaban confinadas o semiconfinadas en grandes cañones en las zonas intramontañosas, para convertirse en corrientes de régimen abierto y formar canales anastomosados en la zonas de pie de

1. PARTICULAS DE ORO y aspecto característico que ofrecen según el yacimiento a que pertenezcan. Las tres muestras aquí recogidas lo fueron en la provincia de León. Arriba, a la izquierda, el oro está engarzado en cuarzo; se recuperó en Andiñuela. La pepita de la derecha se halló en la cuarta terraza cuaternaria del río Duerna; pesa 0,5 gramos y su superficie irregular está desprovista de la película de óxido de hierro. Las pepitas de la fotografía inferior son del yacimiento mioceno-plioceno de las Omañas, en ellas puede apreciarse la entonación rojiza que produce en las superficies la rubefacción. Las partículas están libres.







2. EN EPOCA ROMANA se explotaron casi todos los yacimientos auríferos primarios –en roca– o secundarios –aluviones y coluviones– del noroeste de la península ibérica. La mayoría de ellos se concentraban en el *Conventus Iuridicus Asturum*: occidente de las actuales provincias de Asturias y León, sobre todo. Las vías construidas entre *Asturica Augusta* (Astorga), *Lucus Augusti* (Lugo) y *Bracara Augusta* (Braga) formaron la arteria de comunicación sobre la que se desarrolló la actividad minera en el noroeste.

monte. Su origen primero fueron los movimientos de la fase sávica que alcanzaron la Cordillera Cantábrica y los Montes de León, creándose un enorme potencial erosivo.

La explicación del incremento de las leyes de oro en la zona cercana al contacto con el lecho rocoso, en estas potentes series rojas miocénicas, posiblemente esté en la preconcentración de oro que se debió producir en el suelo ferruginoso tropical existente en el área madre, antes de comenzar el desmantelamiento de la misma. El potente humus de un suelo bien desarrollado puede hacer precipitar el oro que ha pasado en disolución desde la roca madre. Así, el primer episodio de abanicos aluviales que se ha nutrido de un suelo "preparado" es el más rico.

Los depósitos fluviales pliocenos, conocidos como *rañas* en la geología peninsular española, pueden dar origen a yacimientos secundarios, así como las sucesivas terrazas fluviales pleistocenas y holocenas si han tenido una área madre adecuada. Los aluviones actuales de los ríos también fueron trabajados por los romanos en algunos puntos, aunque no pudieron alcanzar el lecho rocoso, junto al que existe una mayor concentración de minerales pesados, debido a la existencia de un manto freático importante que no podían desecar. En Montefurado (Lugo), sin embargo, desviaron el curso del río Sil a través de un túnel horadado en la roca, explotando intensamente los aluviones, ya secos, de un meandro encajado. Normalmente, a excepción del caso antedicho, solían trabajar hasta falsos lechos rocosos –niveles de encostramiento de óxidos de manganeso u horizontes arcillosos– por encima del nivel freático con sensibles incrementos en el contenido de oro.

Otros yacimientos secundarios son las morrenas glaciares, conos de deyección y aluviones fluvioglaciares y coluviones periglaciares. Todos estos depósitos tienen un desarrollo importante en la Sierra del Teleno. Hasta allí subieron los romanos para explotar todos estos arrastres de la glaciación Würm (datada en Europa desde −80.000 a −10.000 años), la única que como tal ha conocido la península ibérica.

Por último hay que considerar los placeres residuales derivados de la meteorización de los filones de los yacimientos primarios, que suponen una primera concentración casi *in situ*. Muchos de los yacimientos considerados primarios son en realidad placeres residuales, que en zonas de fuerte meteorización pueden llegar a tener una potencia apreciable.

¿Cómo se realizó la transferencia del oro de los yacimientos primarios a los secundarios? Parece que en el caso de las terrazas cuaternarias, aluviones y depósitos de influencia glaciar, la simple erosión y el consiguiente transporte ha sido el mecanismo común. Para explicar la presencia de oro en los yacimientos cenozoicos hay que recurrir también a la existencia de otros procesos. En los aluviones se encuentran partículas de oro mayores que en los yacimientos primarios; los abanicos aluviales terciarios no son una excepción en este punto. Se ha explicado este crecimiento de los granos auríferos por disolución del oro nativo primario y posterior precipitación en el suelo.

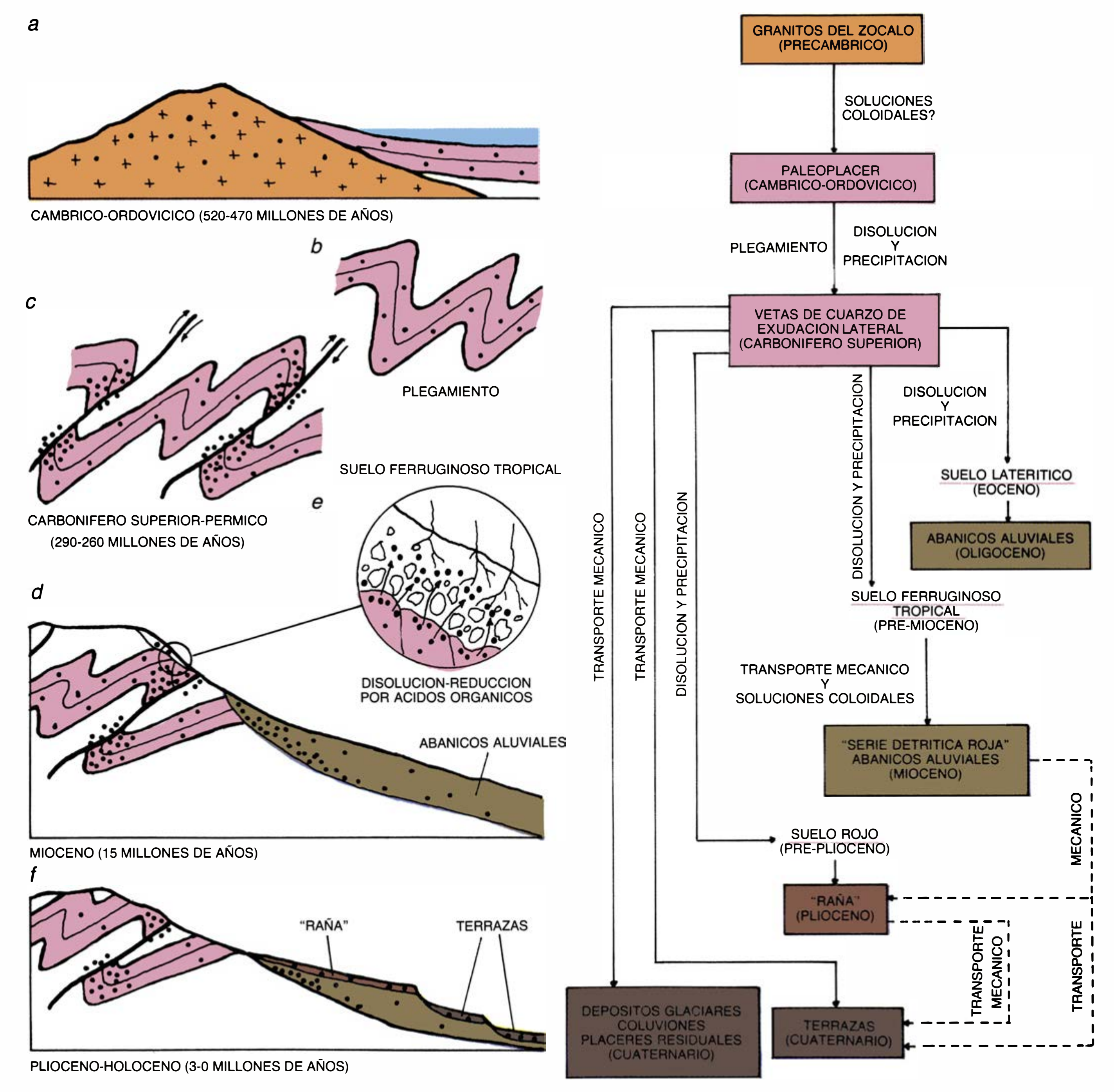
A favor de este procedimiento aboga el hecho de que el oro secundario contenga menos plata que el primario, ya que una vez en disolución la plata es más difícilmente reducible y sigue disuelta. Otro caso son las enormes concentraciones –600 partes por millón– encontradas en las cenizas de ciertos géneros de plantas (esquisetales) que multiplican la concentración de ciertos suelos donde crecen.

Sin embargo, es difícil alcanzar las condiciones que permiten la disolución del oro en un ambiente exógeno. Cloke y Kelly comprobaron en 1964 que concentraciones apreciables, del orden de los 10^{-5} moles por litro, sólo se conseguían con un pH inferior a 5,5 y un Eh superior a 0,9. (Eh designa el potencial de oxidación.) Los valores de pH pueden ser de ese orden en un suelo tropical o subtropical y el potencial de oxidación puede aumentar con la presencia de iones manganeso y hierro. No es fácil justificar un $[Cl^-]$ que sea mayor que $10^{-3,2}$ moles/litro, valor necesario para poner en disolución el oro como perclorato de oro más estable que Au^{3+} y otros compuestos. La geoquímica del oro se encuentra en revisión y se desconoce el auténtico mecanismo para que entre en solución en condiciones exógenas.

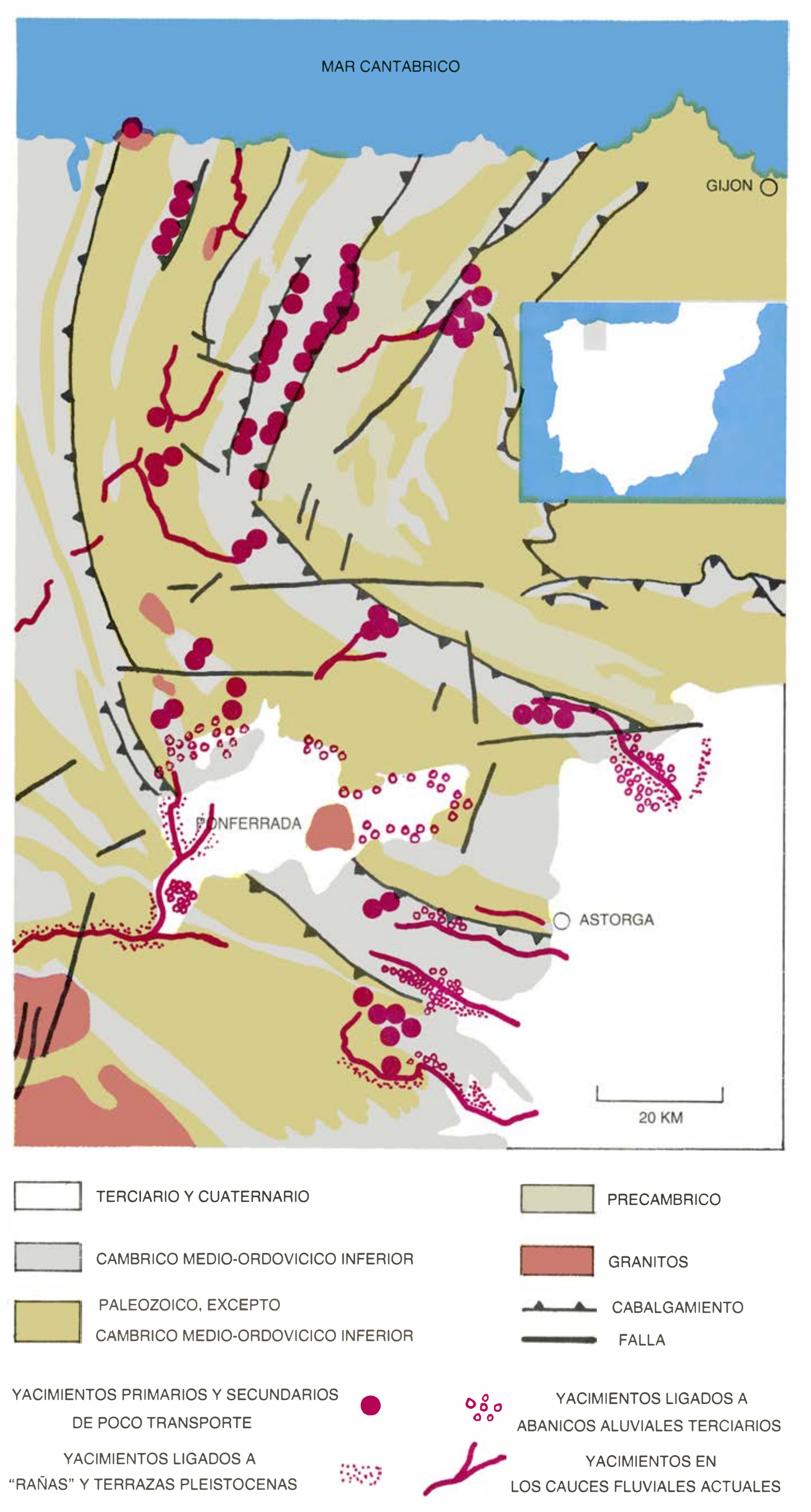
En los yacimientos cenozoicos estudiados por nosotros existe un 27 por ciento de la totalidad del oro que es menor de 5 micras y que constituye una segunda población no recuperable en una operación minera. Lógicamente su forma de transporte no ha sido la

misma que la de la primera población, con más de 80 micras de diámetro. Diríase que se trata de dispersiones coloidales de oro. En condiciones naturales, se forman soluciones coloidales por medio de abrasión de cuarzo en medio acuoso; también, por la reducción de soluciones áuricas poco concentradas. Las soluciones coloidales así formadas pueden ser transportadas por medio de otros coloides de signo contrario (positivo) o por minerales arcillosos. La caolinita, que en el yacimiento de Las Omañas supera fácilmente el 15 por ciento de los minerales de arcilla, es capaz de fijar uno o dos miligramos de oro por 30 gramos de arcilla. Los mecanismos de fijación son los iones de cambio H, Na y Ca que se encuentra en la periferia de las láminas de arcilla, ya que son los responsables del signo positivo que atrae los coloides negativos.

¿Qué decir de la naturaleza y contenido de los diferentes tipos de yacimientos? En los yacimientos primarios gallegos, el oro se encuentra limitado a los filones. Es muy difícil evaluar los contenidos de oro, ya que éste va unido muchas veces a la arsenopirita y en todos los casos su distribución es muy irregular. Los yacimientos asturleoneses presentan leyes muy bajas. (Hablando de minerales, la ley es la cantidad de metal contenida en unidad de peso o de volumen de roca.) Apenas se consiguen muestras con leyes superiores a 5-6 gramos por tonelada, esperándose en el mejor de los casos valores



3. RECONSTRUCCION de la historia geológica del oro asturleonés. Comenzaría con la existencia del metal (*puntos negros*) diseminado en el zócalo precámbrico (*a*). El oro fue trasladado en época paleozoica a los extensos arenales costeros que hoy día se conocen como "Serie de los Cabos" del tránsito Cámbrico-Ordovícico (*capas rosas en el esquema*). Posteriormente, la orogenia hercínica (*b*) obligó a este oro finísimo a migrar hacia las zonas de mínima tensión (*fracturas*) y precipitar en ellas o en sus proximidades (*c*). En el Cenozoico, coincidiendo con los movimientos tectónicos alpinos que levantan los bloques ya plegados, comienzan a erosionarse estos "filones de exudación lateral" y se inicia a su vez otro transporte de oro hasta los abanicos aluviales terciarios (*d*), pasando por una disolución y posterior precipitación en el suelo ferruginoso tropical (*e*), y las terrazas, coluviones y depósitos glaciares (*f*).



4. DISTRIBUCION DE LOS YACIMIENTOS AURIFEROS en relación con la geología de la región asturleonesa. Lo primero que llama la atención del investigador es la correspondencia general que se da entre los yacimientos primarios y secundarios de poco transporte con las areniscas y cuarcitas del Cámbrico medio-Ordovícico inferior y con las grandes líneas de cabalgamiento hercínicas, observación que apoya el criterio de un oro depositado en las cuarcitas y removilizado hacia áreas de tensiones mínimas, como son las líneas de cabalgamiento y pequeños cobijaduras y fallas inmersas acompañantes y próximas. Los placeres residuales y coluviones se han definido como yacimientos secundarios de poco transporte. El tránsito entre placer residual y yacimiento primario es insensible en áreas fuertemente meteorizadas.

de 0,5 a 3,5 gramos por tonelada. Los romanos explotaron con intensidad placeres residuales que recubren los filones frescos.

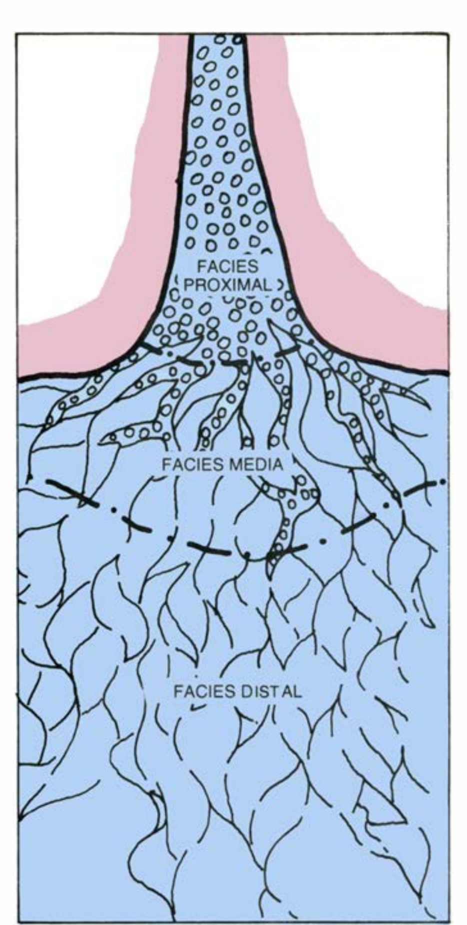
A veces, el oro no se encuentra en el cuarzo del filón, sino en las cuarcitas silicificadas que forman la caja del mismo. Si asimilamos estos filones como de exudación lateral a causa de la fuerte tectónica hercínica y el oro, que estaba diseminado en la cuarcita, migra junto con la sílice hacia zonas de escape (mínima presión), podemos entender que no necesite llegar al filón o veta en sentido estricto y que precipite cuando las condiciones de presión sean suficientemente bajas.

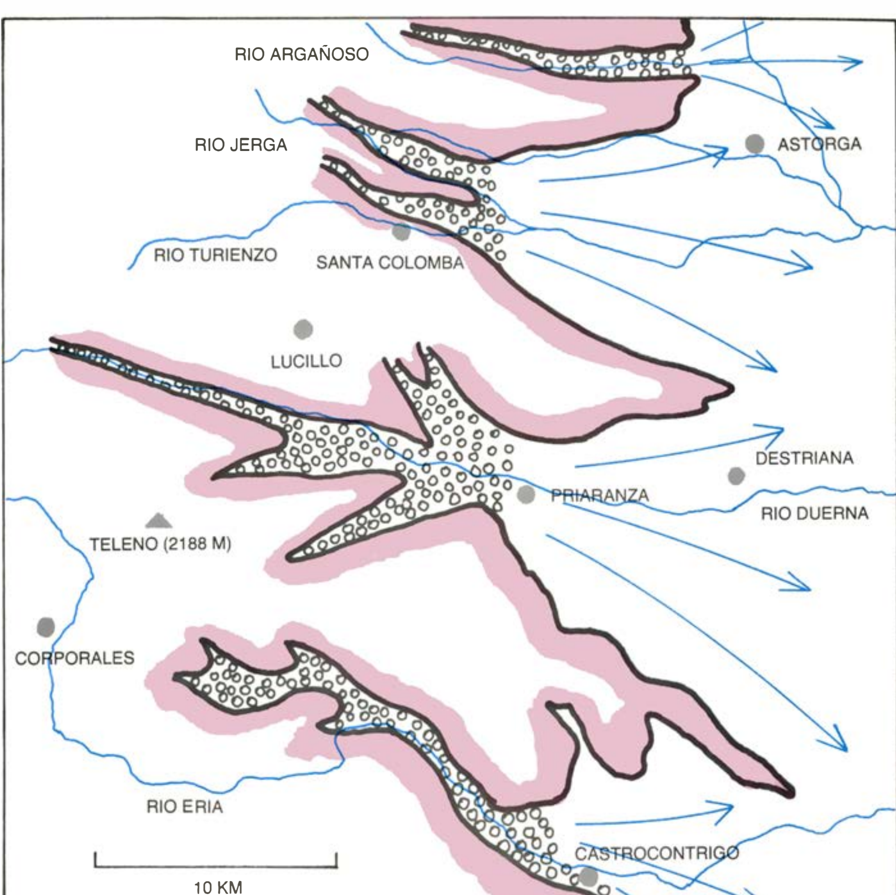
Las partículas de oro de la población gruesa de los aluviones oligocenos y miocenos (de un diámetro superior a las 80 micras) son láminas que se comportan hidráulicamente como discos circulares con una relación de diámetro a espesor entre 10 y 30. Todas estas partículas se encuentran libres, sin engarces; presentan una fuerte rubefacción o recubrimiento por una lámina de óxidos de hierro (limonita) que impide la amalgamación. Este es un fenómeno común en todos los aluviones auríferos formados bajo climas cálidos con dos estaciones, seca y húmeda.

Dentro de la serie detrítica roja, en su contacto con el lecho rocoso paleozoico, existen zonas privilegiadas de antiguos canales donde la ley puede superar la cifra de uno o dos gramos por metro cúbico. Estas bonanzas fueron afanosamente buscadas y explotadas por los mineros romanos; en la Valduerna realizaron una explotación subterránea de cierta importancia rastreando este contacto. El resto del Mioceno posee unas leyes muy bajas: los primeros 30 metros por encima del Paleozoico pueden tener contenidos medios de 100-120 miligramos por metro cúbico, siempre en zonas proximales del depósito. Si seguimos ascendiendo en la serie estratigráfica, los valores no rebasan los 50-60 mg/m^3 de oro recuperable por métodos gravimétricos.

En los yacimientos pliocenos (rañas) los mineros romanos explotaron depósitos de 100 miligramos por metro cúbico; en las terrazas cuaternarias los valores serían también de ese orden, al igual que en algunos tramos de los aluviones de los ríos actuales.

En la raña y en las terrazas más antiguas, las láminas de oro presentan rubefacción, pero la población de oro fino no recuperable va disminuyendo en importancia. A partir de la tercera terraza (existen seis y la actual) desaparece totalmente. La distribución de oro en las morrenas y coluviones periglacia-





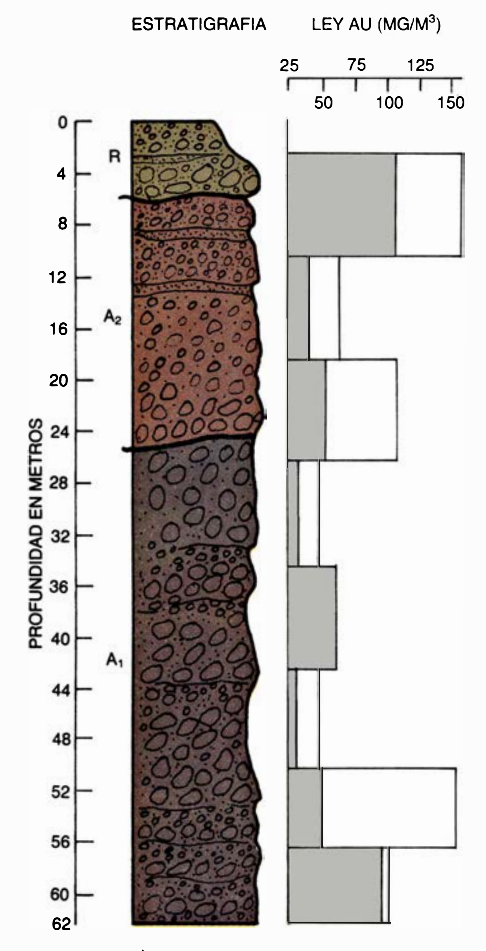
5. DURANTE EL MIOCENO, en los bordes de la cuenca del Duero y en depresiones internas se desarrollaron potentes depósitos de abanicos aluviales. A la izquierda se muestra una reconstrucción paleográfica de los mismos, al oeste y suroeste de Astorga (en la provincia de León). Con círculos se han representado las facies proximales de gruesa granulometría, que encajan en cañones intramontañosos, cuyos restos no erosionados fueron trabajados intensamente por los romanos, con especial atención a su contacto con el lecho rocoso paleozoico. En tonos rosas se ha destacado el borde montañoso. El esquema de la derecha idealiza un modelado de abanico aluvial que se propone como arquetipo para el Mioceno de esta zona. El agua fue el medio de transporte principal, formándose unos tipos de depósitos típicos de medio fluvial: barras longitudinales, rellenos de canal, residuales de canal y otros.

res es aleatoria, debido a la poca clasificación granulométrica de los depósitos. Por otro lado, la relación con la categoría del yacimiento primario del que deriva es en estos casos más estrecha que en cualquier otro.

Vayamos ahora con la evolución seguida por la explotación aurífera romana. Las cortas o vaciados producidos y la red hidráulica que proporcionaban el agua necesaria para la extracción del mineral se superponen entre sí, entrecruzándose y cortándose. Los canales de las explotaciones más bajas quedan cortados por las explotaciones más altas. Esto prueba que la explotación se inició en las zonas bajas de los valles, donde estaban los yacimientos auríferos del Holoceno, y prosiguió en líneas generales su avance hasta beneficiar los extensos aluviones terciarios y por último los primarios, donde se hallaba la roca madre.

Una vez descubiertos los yacimientos, era necesario proceder al trazado de la red hidráulica de canales y depósitos: el agua desempeñaba una función primordial en el proceso de extracción, arrastre y lavado del mineral. Esta operación implicaba un trabajo tan costoso o aún más que las complejas labores de extracción minera. A través de los datos que nos proporciona Plinio y sobre todo gracias a la perfecta conservación de muchos canales romanos en diversas zonas, puede reconstruirse todo el proceso de trazado y construcción de los canales o *corrugi*. Los topógrafos, procedentes seguramente de unidades auxiliares del ejército romano, iniciarían su trabajo desde la zona a explotar, remontando terreno hasta alcanzar las fuentes, ríos o manantiales donde se captaba el agua. Los instrumentos utilizados para conseguir una adecuada nivelación eran la *dioptra*, similar a los actuales niveles de pínulas o con alidada, la *libra aquaria*, iguales a los actuales niveles de agua, y el *chorobates* o corobate. Este último era, según Vitrubio, el aparato topográfico más adecuado para trazar acueductos y, por tanto, canales. Consistía en una gran regla de veinte pies de largo (5,92 metros), con sendas patas perfectamente escuadradas en sus extremos, unidas en su parte más baja por unos travesaños que llevan marcadas líneas bien aplomadas. Con estas líneas han de hacerse coincidir sendas plomadas colgantes desde el borde de la regla. En caso de no poderse producir esta concordancia a causa del viento, se llenaba de agua un canalillo practicado en la parte superior de la regla, de cinco pies de largo (1,48 metros), un dedo de ancho (18,5 milímetros) y dedo y medio de profundidad (27,75 milímetros), que una vez enrasado permitía trazar las visuales horizontales que fuesen necesarias.

En el avance de los topógrafos a la búsqueda de lugares propicios para captar el agua se iría estableciendo ya la nivelación más apropiada, pero el acabado de los canales o *corrugi* se debía hacer posteriormente y en el sentido opuesto, a juzgar por las marcas de cincel o punterola que aún se conservan grabados en los tramos rocosos y que siempre están dadas en el sentido de la corriente. Algunos de los canales medios en la Cabrera y en la Sierra de Teleno revelan un desnivel ligeramente descendente entre 1,2 y 1,9 por ciento. Uno de los más largos de los que abas-



6. EJEMPLO DE YACIMIENTO secundario explotado en época romana. El esquema pertenece al leonés de Las Omañas. Geológicamente se pueden diferenciar tres niveles: A_1, del Mioceno; es un depósito de facies proximal, de abanico aluvial de clima cálido estacional. A_2, del Mioceno también; corresponde a otro complejo de abanicos aluviales de clima algo más seco que el anterior. Arriba se encuentra la *raña*, *R*, depósito provocado por corrientes anastomosadas bajo un clima tipo sabana. Las leyes de oro se incrementan en la base de la *raña* y del abanico aluvial A_2, así como en los niveles inferiores de A_1. Todo lo anterior motivó la racionalización de la explotación romana, beneficiando la *raña* con *surcos convergentes*, sistema óptimo para depósitos extensos y poco potentes, y para A_2 se emplearon las *zanjas-canales*, aprovechando la caída del terreno. En el histograma, se representa en gris el oro recuperable (partículas con un diámetro superior a las 80 micras), correspondiente al oro detrítico o que ha sufrido transporte mecánico; en blanco figura el no recuperable (partículas con un diámetro inferior a los 80 micrometros), que es el correspondiente a oro coloidal.

tecen las Médulas de Carucedo (León) alcanza un trazado de al menos 48.400 metros de longitud; nace a unos 1400 metros de altura y desciende hasta 980-960 metros.

La perfecta nivelación conseguida por los ingenieros romanos ha permitido su utilización hasta la actualidad, como ocurre con el que abastece de agua al pueblo de Manzaneda (La Cabrera, León). Otros muchos han sido utilizados como caminos de montaña o cañadas y se denominan carriliegos en León o antiguas en Asturias y Lugo.

Los canales de captación y conducción llevaban el agua hasta los depósitos de almacenamiento y distribución, desde donde salían los canales de distribución hasta los depósitos de explotación situados en lo alto de las cortas mineras. Los depósitos, *stagna* o *piscinae* según Plinio el Viejo, se construían excavando el terreno y utilizando la tierra extraída para levantar un talud alrededor que duplicaba la capacidad de almacenamiento de agua. De los depósitos de explotación salían los canales de explotación que vertían el agua sobre las cortas a través de bocas reguladoras o *emissaria*.

Los sistemas de extracción pueden dividirse en dos grandes grupos: los aplicados sobre yacimientos secundarios y los practicados en los yacimientos primarios. Esta diferenciación se basa fundamentalmente en dos factores: *a*) En primer lugar, la cohesión y dureza del material explotable en ambos tipos de yacimientos son distintas y fuerza al uso de métodos de extracción también diferentes. *b*) Lo mismo ocurre respecto a la preparación del material extraído, ya que el oro se halla libre en los yacimientos secundarios, pero no así en los primarios, donde es preciso realizar una serie de trabajos de preparación antes de proceder al lavado y obtención del oro mineral.

El bateo es el más antiguo y más sencillo de los sistemas de extracción para beneficiar yacimientos auríferos. Se ha practicado siempre según el mismo procedimiento. Se extraen las arenas fluviales y se eliminan los materiales más gruesos mediante un cribado. A continuación se introducen en un recipiente de forma cónica o batea a la que se imprimen movimientos giratorios, a la par que se dejan salir los materiales más livianos, hasta que en el fondo de la batea sólo quedan los fragmentos de los minerales más pesados, oro incluido. Este concentrado final se llamaba *segullum* o *segutillum*.

En alguno casos, el beneficio de los placeres fluviales se hizo desviando el curso del río, de forma que toda la grava aurífera depositada en el cauce desecado pudiera lavarse fácilmente. El lavado superficial se realizaba con dos finalidades: para extraer las capas superficiales y prospectar en los grandes yacimientos, o para explotar aluviones de poco espesor, generalmente en las terrazas actuales de los ríos.

La explotación de yacimientos de gran extensión y escasa potencia, o grosor, en especial de las rañas y terrazas antiguas, se hizo mediante el sistema denominado series de surcos convergentes. Consiste en ir explotando todo el yacimiento mediante grandes surcos o zanjas paralelas entre sí y convergentes hacia un mismo punto, donde se instalaban los canales para retener el oro; producen el aspecto externo de grandes campos roturados con arados gigantescos. La explotación se realizaba surco por surco y serie por serie, hasta abarcar todo el yacimiento. El material era arrastrado por la fuerza del agua. Ejemplos de este tipo de explotación son las series de surcos convergentes realizadas en las rañas o terrazas del río Omañas, Duerna o Eria (León), Sil a su paso por el valle de Quiroga (Lugo) o del Tioira cerca de Maceda (Orense).

Las zanjas-canales constituyen un sistema de extracción similar al anterior, a mayor escala. Se realizaron en yacimientos de gran potencia, como las series detríticas rojas del Mioceno de las Omañas o del río Boeza (León). Los desniveles existentes entre sus cotas más altas y la parte baja se aprovecharon para que el agua arrastrara el material por sí misma, produciendo enormes zanjas o cárcavas artificiales.

Las cortas de arrastre se utilizaron en yacimientos cuya situación topográfica impedía la llegada de agua hasta su zona más alta. Por esta razón, el abatimiento del material debía producirse socavándolo por abajo, mediante una corriente de agua continua que la iba erosionando y producía su progresivo derrumbamiento.

De todos los procedimientos de extracción empleados por los romanos, el más espectacular fue el de la *ruina montium* o *arrugia*. Se trataba de grandes cortas de minado al aire libre, es decir, abiertas, no subterráneas; se construían pozos y galerías entibadas sobre el conglomerado de arcillas y guijarros, *gangadia* o *gandadia*, que se deseaba abatir. Una vez acabada esta red de minados, se dejaría entrar el agua en tromba, lo cual producía una fuerte presión que causaba el desplome de toda la zona minada. A continuación, bastaba con dejar caer el agua desde los depósitos situados en lo alto de las cortas, de forma que fuese deshaciendo y arrastrando el conglomerado hasta los canales de lavado y decantación del oro. De esta forma se produjo la explotación de los aluviones de las Médulas de Carucedo, algunas zonas de la Valdería y la Valduerna (León), A Medua (Orense) y otros. Es posible que este método se aplicase también sobre algunos yacimientos primarios, por ejemplo en Salave (Oviedo) o en el

Poço das Freitas (norte de Portugal), donde el granito explotado está muy alterado y se descompone fácilmente.

Un último procedimiento de extracción en época romana en los yacimientos secundarios fue la minería subterránea. Practicada de una forma muy puntual, sólo se conocen dos casos: uno, el ya mencionado en la orilla izquierda del río Llamas (La Valduerna, León); otro, las labores situadas al pie de la Corona de Corporales (La Cabrera, León). En ambos casos se benefició el contacto de los aluviones auríferos con el lecho rocoso.

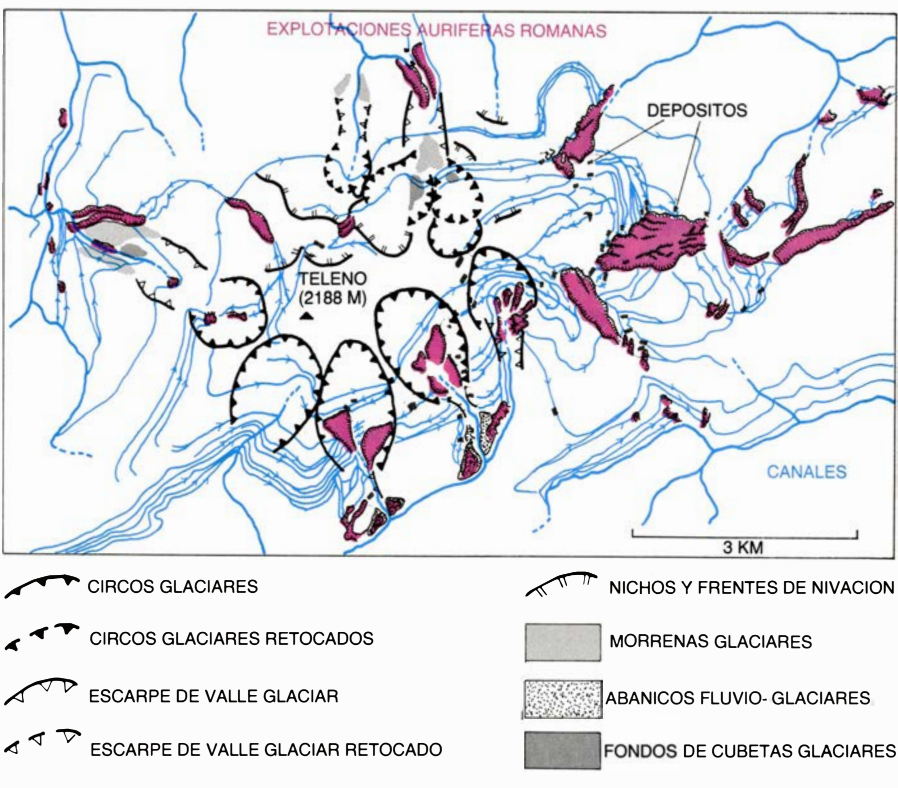
El valor del agua como fuerza de extracción no era tan importante en los yacimientos primarios como en los secundarios. La mayoría del material primario removido en época romana lo fue en cortas a cielo abierto. El proceso de extracción se iniciaba haciendo una trinchera que socavaba la masa de roca a abatir, colocándose los correspondientes entibos de madera. El abatimiento se conseguía mediante las fuertes tensiones que producía en la roca el empleo alterno de fuego y agua y colocando cuñas que ayudasen al resquebrajamiento de la roca por todos los lados. El agua se vertía desde los depósitos situados en la zona más alta de la corta, por lo que la red de abastecimiento seguía teniendo cierta importancia. Una vez abatido el mineral aurífero, se procedía a su selección y trituración para que el agua lo arrastrase hasta el lugar donde se lavaba y obtenía el oro-mineral.

El empleo en época romana de minería subterránea con galerías y pozos es menos frecuente que el de cortas a cielo abierto. Se recurría a ella para beneficiar lo que Plinio denomina *aurum canaliensis*, porque las vetas o filones de cuarzo aurífero se iban excavando mediante canales o galerías subterráneas. Este procedimiento sólo se aplicaba en aquellos yacimientos cuyos filones o vetas tenían una potencia y ley de oro considerables.

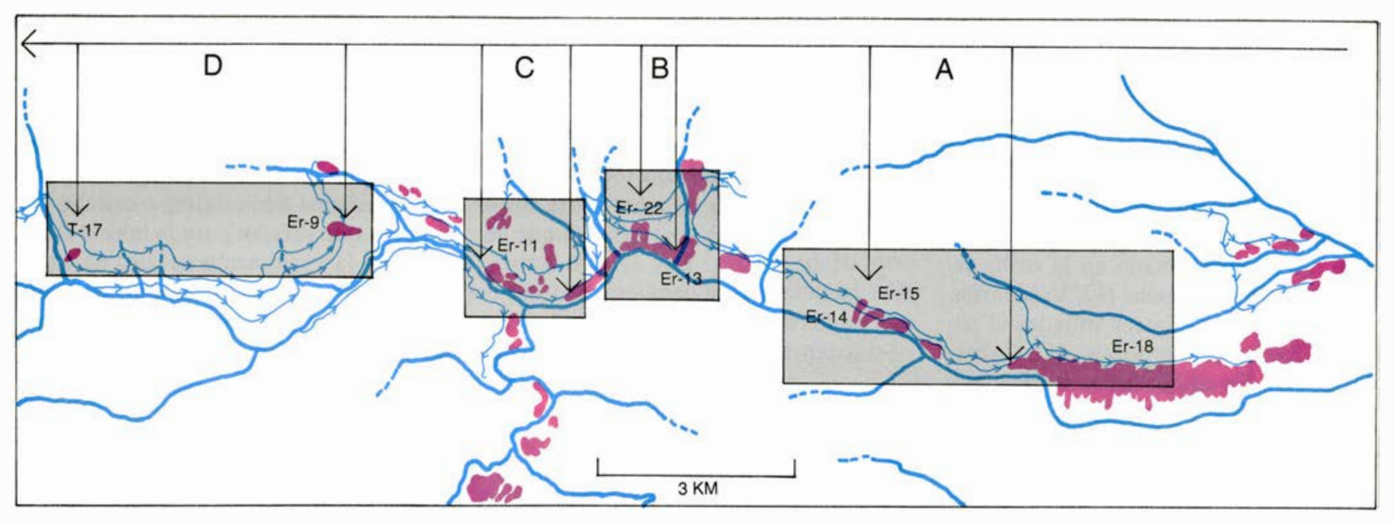
Además de batear en los arroyos y arrastres naturales que se producían en las inmediaciones de los yacimientos, el mineral primario se prospectaba también excavando trincheras o galerías subterráneas, los *ternagi* de que hablan las leyes de Vipasca. (Estas leyes están inscritas en unas tablas de bronce encontradas en las minas portuguesas de Aljustrel.)

Los procedimientos de enriquecimiento, lavado y obtención del oro mineral variaban también según el tipo de material explotado. El oro contenido en los aluviones y conglomerados secundarios se hallaba en estado libre y sólo debía someterse a un lavado y un tratamiento físico, seguramente la fusión, en caso de que las partículas de oro poseyesen rubefacción. El lavado se realizaba encauzando todo el material arrastrado por el agua hasta unos canales de madera o *agogae*, donde se depositaba el oro. Las *agogae* consistían en unos largos canales construidos con tablas de madera, con algún tipo de obstáculos en su fondo: tablas transversales, piedras o ramajes resinosos sujetos con cantos, las *ulices* a que se refiere Plinio que ayudaban a que el oro se depositase por gravedad, mientras que los estériles menos pesados eran arrastrados por el agua. Las *agogae* eran muy similares a los *sluices* o canales de madera que servían para la misma finalidad en la explotación del oro en California durante el siglo pasado. De tiempo en tiempo, el fondo de los canales de madera se limpiaba y los ramajos





7. EXPLOTACIONES AURIFERAS de la Sierra del Teleno (León). A pesar de la gran altitud media de la zona, los romanos construyeron una densa red de canales y depósitos a fin de beneficiar los yacimientos primarios y los secundarios de poco transporte a ellos asociados. No es casual que explotasen estos últimos, generados por una fuerte erosión, puesto que constituían una primera concentración aurífera. En la fotografía se aprecian los canales de conducción y remociones efectuadas en el circo y valle glacial.



8. SUPERPOSICION ENTRE EXPLOTACIONES auríferas romanas y sus correspondientes canales de abastecimiento de agua; el que detallamos aquí es un sector de la cuenca del río Eria. Se destacan los sucesivos cortes de canales por labores mineras situadas cada vez más río arriba. De esta forma podemos establecer una cronología relativa A-B-C-D y deducir que tuvo que existir un proceso de prospección que permitiese llegar a los romanos desde el yacimiento secundario de Er-18 hasta la corta sobre yacimiento primario o en roca de Er-19 y el yacimiento secundario, de poco transporte, denominado T-17.

que servían para retener el oro se quemaban. Como última fase del proceso, el concentrado aurífero se bateaba, eliminando materiales pesados estériles.

Antes de lavarse en las *agogae*, el mineral de origen primario sufría un proceso de enriquecimiento a través de las siguientes etapas: selección del mineral; trituración y molienda de lo seleccionado, fase perfectamente documentada en el noroeste a través de numerosos hallazgos de molinos en las cercanías o en los asentamientos ligados a los yacimientos primarios; cribado del concentrado para eliminar la ganga más gruesa y lavado en las *agogae*. Los minerales que estaban asociados a sulfuros, especialmente cuando llevaban arsénico, debían ser sometidos también a un proceso de tostación y a un tratamiento físico de fusión, para volver a ser molidos, cribados y lavados a fin de obtener el concentrado aurífero.

El oro del noroeste peninsular fue explotado en la antigüedad en dos épocas distintas y por motivos diferentes. En época prerromana, antes de que Augusto incorporase toda la zona al Imperio Romano, el oro poseía un valor no fiduciario, aunque sí encerrase un carácter de diferenciación social y se utilizase como producto comercial. En época romana se explota ya en directa relación con la política monetaria: posee un valor de patrón y circula como moneda de curso legal.

De la distribución de los hallazgos de orfebrería prerromana en el noroeste puede deducirse que las corrientes fluviales debieron suministrar el mineral aurífero necesario. Es relevante la casi inexistencia de hallazgos en las principales zonas auríferas primarias o de aluviones antiguos consolidados, las más explotadas en época romana. Las fuentes literarias clásicas relativas a acciones romanas (campañas de Bruto y César) o descripciones de los pueblos del noroeste (fundamentalmente la de Estrabón), con anterioridad a su conquista definitiva, dan a entender la riqueza aurífera de los lusitanos, brácaros, galaicos y célticos en sentido genérico; concretan el carácter aurífero de los ríos de la vertiente atlántica al norte del Tajo; únicamente hablan de sistemas de explotación al referirse a los ártabros o arotebras. En ningún momento se refieren a los astures, en cuyo territorio se desarrolló más intensamente la explotación romana.

Con posterioridad a la conquista romana del noroeste hay que analizar sobre todo el vocabulario que emplea Plinio al referirse a la minería del oro, en el que se han basado diversos autores para deducir la existencia de técnicas de explotación prerromanas más allá de los yacimientos propiamente fluviales. Existen tres términos que pueden deberse al beneficio de placeres en los ríos: *palagae* o *palacurnae* y *baluces*, oro en pepitas y en polvo, respectivamente. La pureza con que se encuentran en las corrientes fluviales facilitaría una diferenciación a simple vista del tamaño de las partículas. *Apitascudis* y *tasconium* son términos más propiamente metalúrgicos que mineros; el primero significa concentrado o polvo aurífero resultante de eliminar los minerales o gangas que quedaban con el oro tras el lavado fino; el segundo designa un tipo de arcilla blancuzca, que sería muy semejante al caolín, abundante en el noroeste y que se empleaba para hacer los crisoles o *catini*, palabra totalmente latina que implica ya una tecnología. *Tallutium* o *tallutatium* significa terreno donde se encuentra oro en superficie y subterráneamente, es decir, ha de ser un yacimiento secundario. El mismo significado topográfico tendría la palabra *alutia*, empleada para designar las minas de oro en general.

Gandadia o *gangadia* designan cierto tipo de arcillas mezcladas con guijarros, es decir, puede aplicarse a los yacimientos secundarios del noroeste, pero hay que tener en cuenta también el significado de los topónimos actuales *gandra, gandara, granda* y derivados, provenientes del término adoptado por Plinio y que significan terreno con abundantes cantos rodados, pedregal o tierra estéril en general; en definitiva, la palabra *gandadia* o *gangadia* no implica ninguna técnica minera, sino un determinado tipo de terreno de carácter aluvial y estéril para el cultivo en muchos casos, aurífero o no. Del significado de *urium*, cierto tipo de lodo pernicioso para los canales mineros, puesto que los obstruiría, se deduce la inexistencia de referencia a técnica alguna.

La numerosa mano de obra no cualificada que intervenía en las explotaciones era indígena; es más, buena parte de las tropas destacadas en las diversas zonas mientras habían sido reclutadas en el mismo noroeste peninsular. Esta población pudo ser una excelente vía de penetración del mencionado vocabulario en la terminología romana.

Por último, se puede establecer un paralelismo entre la explotación prerromana y la realizada hasta casi la actualidad en algunas zonas de Galicia, León y Asturias. No se trata de ninguna pervivencia bimilenaria, pero sí existe una estrecha semejanza en la técnica

de explotación. Por tanto, los yacimientos beneficiados debieron ser aproximadamente los mismos, máxime teniendo en cuenta que sólo los placeres fluviales y terrazas actuales de los ríos permiten una explotación artesanal. Por otro lado, la producción que podría conseguirse mediante este tipo de explotación artesanal no es despreciable y serviría para atender una creación orfebre no monetaria, como era la prerromana.

Podemos aportar algunos datos relativos a la extracción de oro fluvial en la década de los treinta del siglo pasado. Según el geólogo G. Schulz, unas 200 *aureanas* y *oureiros* trabajaban en las Valdeorras y Ribas del Sil durante el estío, obteniendo del río Sil una producción que les dejaba unos 100.000 reales, lo que equivaldría a 2.470-2.875 gramos, aproximadamente; es decir, cada *aureana* conseguía unos 12-14 gramos de oro por campaña estival. El estudio de la toponimia mayor aurífera confirma lo hasta aquí dicho. La mayoría de los topónimos se concentran en la periferia del noroeste peninsular, en las cuencas bajas de los ríos. Lógicamente son más abundantes en las proximidades de ríos auríferos, como el Lor (Lugo). Hay que destacar, asimismo, la ausencia de toponimia mayor aurífera en las principales zonas explotadas por los romanos, incluso donde existen grandes yacimientos secundarios, como es el caso de la cuenca alta del Sil y la cuenca entera del Orbigo. Además, en la toponimia menor de las explotaciones auríferas romanas escasean los nombres auríferos o mineros, mientras que abundan bastante las denominaciones que asimilan los trabajos a accidentes naturales o les asignan un carácter artificial, sin especificar de qué tipo.

Las únicas explotaciones auríferas que pudo trabajarse desde la época de Augusto fueron las del norte de Portugal –zona cercana a Oporto, como las minas de Valongo, y zona de Três Minas y Jales– y la cuenca baja del Miño. Desde el comienzo de las labores, las explotaciones fueron llevadas a cabo como un monopolio estatal, ya que eran propiedad del fisco imperial, según señala Estrabón para las minas de oro, en contraposición a las de plata. Así pues, desde sus inicios la administración estaría bajo la responsabilidad directa del *procurator* o gobernador de la provincia Citerior, quien recibiría el apoyo del legado militar existente por entonces en la región astur-galaica, al mando de las *Legiones X Gemina* y *VI Victrix*.

Esta estructura duró hasta la división de la provincia Citerior en *Conventi Iuridici*, aunque las tropas estacionadas en la zona minera debieron variar hacia mediados del siglo I d.C. o, en todo caso, antes del 63 d.C., cuando la *Legio X Gemina* es enviada a la frontera danubiana. Piezas arqueológicas de época de Augusto y Tiberio se han encontrado en el norte de Portugal y en las cuencas de los ríos Duerna y Turianzo, aunque los asentamientos mineros de la primera cuenca, las coronas de Quintanilla, Luyego I y II, Filiel y Boisán, no se ocupan hasta los años 15-20 d.C.

Se dio una relación directa entre las tropas y la red viaria. Esto respondería tanto a un necesario control de la zona recientemente dominada, como a la preparación de la infraestructura de explotación del territorio. No se poseía un conocimiento exacto de la riqueza aurífera del noroeste y, por tanto, tuvieron que realizarse amplios trabajos de prospección antes de llegar a explotar zonas tan inhóspitas como la Sierra del Caurel en Lugo, el Valle de las Montañas en Asturias o la Sierra del Teleno o la Cabrera en León. Esto explicaría la falta de epígrafes militares en el valle del Sil durante esta primera época. Así pues, la labor del ejército sería en primer lugar finalizar la red viaria articulada entorno a las tres ciudades más importantes del noroeste: *Lucus Augusti* (Lugo), *Bracara Augusta* (Braga) y *Asturica Augusta* (Astorga), es decir, el trazado correspondiente a las vías XVII, XIX y XX del Itinerario de Antonino. En segundo lugar, establecer dentro de dicha red viaria una serie de campamentos-base desde los que poder controlar fácilmente toda la labor minera. Y por fin, proveer el personal técnico especializado para poner en marcha el complicado sistema de explotación minera. Esta labor sería la desempeñada desde mediados del siglo I d.C. por los ocupantes, seguramente una *vexillatio* o destacamento militar, del yacimiento arqueológico de La Huerña, en La Valduerna leonesa.

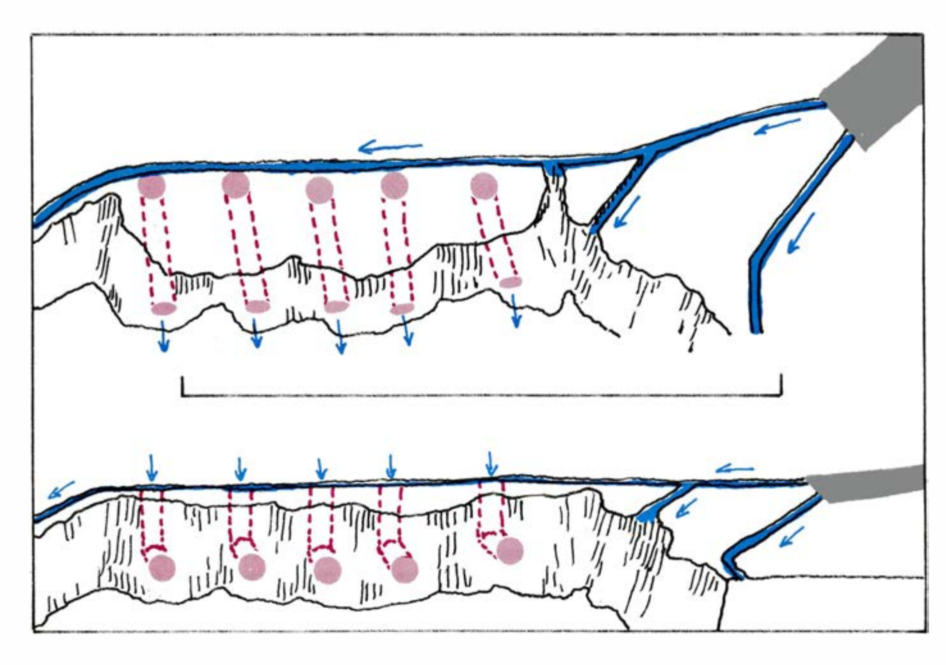
La mano de obra estaba formada por indígenas que en muchos casos sufrieron un traslado hacia las zonas a explotar. Allí se les asentó en verdaderos



9. TORQUE DE ORO. Los torques son sin duda las joyas más típicas de la orfebrería prerromana del noroeste peninsular. Este fue encontrado en las inmediaciones de Burela, al norte de Lugo; con sus 1790 gramos, es el más pesado de todos los torques castreños. El oro para su elaboración se extrajo seguramente de los placeres fluviales, explotados hasta hace muy poco por las *aureanas* y *oureiros* mediante unos sistemas artesanales casi iguales a los que utilizaban en época prerromana las mujeres de los ártabros. Hacia los años 30 del siglo pasado, los bateadores de las zonas de Las Valdeorras (Orense) y Ribas del Sil (Lugo) obtendrían por este procedimiento unos 12-14 gramos por persona durante el estío.







castros de nueva planta. Estos asentamientos seguían modelos prerromanos, lo que refuerza el carácter territorial que algunos autores asignan a las centurias o *castella* que aparecen en la epigrafía romana del noroeste peninsular. A juzgar por el carácter de los asentamientos, no puede considerarse su población como esclavizada; los romanos mantuvieron su régimen de vida, aunque les forzaron a desplazarse e hicieron trabajar en las explotaciones mineras. Como contrapartida, los pueblos indígenas vieron algo elevado su nivel de vida, beneficiándose de los productos romanos.

En época flavia (69-96 d.C.) la explotación aurífera del noroeste conoció un fuerte impulso. Varias son las razones que lo abonan. De las tablas de *Vipasca* ya mencionadas se deduce la promulgación en esta época de una *Lex Metallis Dicta* que regulaba el funcionamiento administrativo y técnico de todos los distritos mineros. A partir del 79 d.C., aparece documentado el *Procurator Augusti Asturiae et Gallaeciae*, cargo de rango ecuestre vigente hasta finales del s. II d.C. y creado para preservar los especiales intereses financieros y fiscales romanos en la zona. Dentro de la misma política, hay que apuntar la aparición, al menos desde el 138 d.C. y hasta el 260 d.C., de un *Legatus Augusti Iuridicus Asturiae et Gallaeciae*, en relación con la ya mencionada existencia de posibles medidas jurídicas especiales sobre minería, aparte de su labor ordinaria. También es un hecho admitido la creación en época flavia de la vía XVIII del Itinerario de Antonino o *Via Nova*, un nuevo camino entre *Asturica Augusta* y *Bracara Augusta* abierto a través de las importantes zonas mineras de la Maragatería occidental, El Bierzo, el Valle del Sil y el norte de Portugal, y, lo que es más importante si cabe, facilitando la interconexión de todas las zonas explotadas a través de una red viaria de orden secundario.

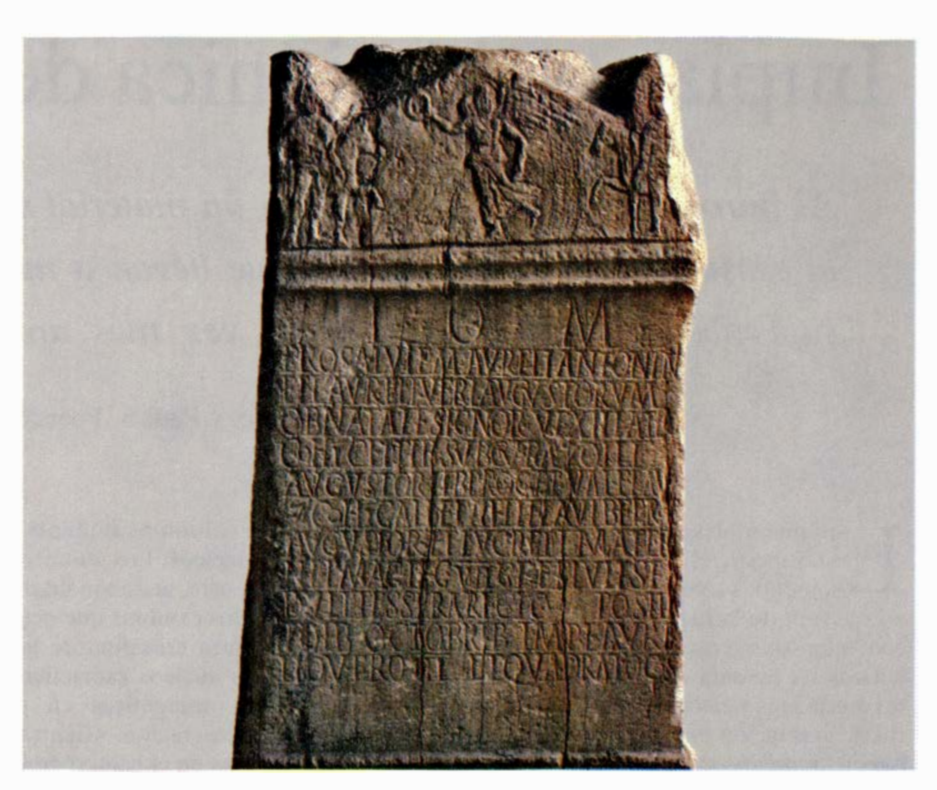
10. EXPLOTACION AURIFERA sobre yacimiento secundario de Piozadera. El estudio estereoscópico de la fotografía aérea del recuadro superior y los trabajos de campo han permitido realizar la interpretación del dibujo central, donde se reconstruye el estado en que quedaron las explotaciones, canales y depósitos romanos tras su abandono. Las zonas coloreadas de azul fueron beneficiadas mediante un *lavado superficial*, preparatorio seguramente de labores más amplias. En las grises se realizaron *series de surcos convergentes*. La zona principal, A-B-C-D-E, es una *corta de minado*, donde el material aurífero se extraía mediante el sistema de la *ruina montium* o *arrugia*; todavía se aprecian sobre el terreno las bocas de los pozos listos para proseguir la labor interrumpida en la zona B, según se detalla abajo. El resto de la explotación se hizo mediante zanjas-canales.

Los amplios conocimientos que se desprenden de la descripción de Plinio el Viejo acerca de las explotaciones auríferas confirman el auge que habrían alcanzado en la década de los 70 d.C., cuando el naturalista latino fue *Procurator* de la provincia citerior de Hispania. El yacimiento aurífero galés de Dolaucothi también se comenzó a explotar en época flavia, después del 75 d.C., lo que confirma en aquella época la utilización del sistema de cortas al aire libre sobre yacimientos primarios de oro.

De la subida al poder de los flavios hasta Adriano (117-138), sólo existe un intervalo de tiempo con evidente falta de miliarios en la red viaria del noroeste, que pertenece a los años posteriores al 104 d.C. del gobierno de Trajano y debe estar en relación con la captura del botín de las guerras dácicas y el comienzo de las explotaciones auríferas en la nueva provincia, que causaría un relativo abandono, no interrupción, de las explotaciones ibéricas. Esta situación quedó zanjada con Adriano.

A finales del principado de Nerón (en el 69 d.C.) se produce un reajuste tendente a revaluar la moneda de oro, cambiándose la paridad *aureus*/libra de oro de 42/1 a 45/1, hecho consolidado por Vespasiano, que introduce una disminución de la ley de los *aurei*, pasando de 99,1 por ciento, o incluso un 99,8 por ciento, de contenido de oro a 95,8 por ciento. Con Trajano (97-119 d.C.) se produce una nueva depreciación del valor del oro, causada por la influencia del botín dácico.

A partir de la época antoniniana (138-192 d.C.) se producen algunas importantes variaciones en la administración de las explotaciones auríferas. A los funcionarios mencionados se añade ahora el *Procurator Metallorum*, cargo ocupado siempre en el noroeste por un liberto imperial. Dependería del *Procurator Augusti Asturiae et Gallaeciae* y, aunque en el noroeste sólo se documenta entre el 161 y el 191 d.C., bien pudiera existir desde época flavia, puesto que ya en tiempos de Nerva (96-98 d.C.) existe este cargo en el distrito minero de Río Tinto (Huelva). Un cargo auxiliar y dependiente del *Procurator Metallorum* era el de *Beneficiarius Procuratoris Augusti*, documentado entre el 161 y el 175 d.C. El emperador Caracalla (198-217 d.C.) está bien representado en toda la red viaria del noroeste, por lo que podría hablarse de una reactivación de las explotaciones por estas fechas. Este hecho está corroborado por un doble reajuste: administrativo, al crear la nueva provincia *Hispania Nova Citerior Antoniniana*, abarcando *Asturia* y *Gallaecia*, y monetario, al rebajar la paridad *aureus*/libra a 50/1 y disminuir el peso del *aureus* hasta 6,55 gramos de oro.



11. INSCRIPCION MILITAR encontrada en Villalís. Se trata de una lápida votiva dedicada a los emperadores Marco Aurelio y Lucio Vero en el año 167 d.C. por diversos funcionarios y militares relacionados con el mantenimiento administrativo y técnico de las labores mineras. Los funcionarios son: *Zoilus, Procurator Metallorum*, máxima autoridad del distrito minero, y *Aelius Flavius, Beneficiarius* del *Procurator*, a quien auxiliaba en sus labores. Como representantes y máximos cargos de las unidades estacionadas en la zona figuran los nombres de *Valerius Flavius*, centurión de la *Cohorte I Gallica*, *Lucretius Maternus*, portaestandarte de la *Legio VII Gemina*, y *Julius Sedulius*, teserario de la *Cohorte I Celtiberorum*.

Una serie de hallazgos arqueológicos vienen a certificar la intensificación de las explotaciones a finales del siglo I y durante todo el siglo II d.C. Materiales de estos momentos se encuentran en los asentamientos mineros de Huerña en la Valduerna, Sta. Coloma de Somoza en el Turienzo, el Castro de Corporales en La Valderia y Las Médulas de Carucedo, todos ellos en León, y en Salave y los castros de San Chuis y de Andina en Asturias.

Los primeros signos de desmonetización del *aureus* arrancan de los mismos tiempos de Caracalla y se hacen patentes en la segunda mitad del siglo III d.C. a través de la pérdida de su peso y ley. Esta metalización de la moneda de oro le quitó su valor fiduciario en beneficio de una revalorización de los productos en especie. Ello explicaría la falta casi absoluta de pruebas para documentar las explotaciones auríferas del noroeste peninsular, lo que hace pensar en su cese. Efectivamente, las vías más importantes de la zona minera, XVII y XVIII del Itinerario de Antonino, apenas presentan miliarios de esta época y los más representativos, los pertenecientes a los emperadores Máximo y Maximino (235-238 d.C.), especialmente en la vía XVIII, han de ser considerados una labor local del legado Quinto Decio Valeriano.

Los documentos que poseemos desde época flavia nos permiten conocer mejor que en épocas anteriores la relación entre el ejército y las explotaciones auríferas. A partir del estacionamiento de la *Legio VII Gemina* en León y con la incorporación de nuevas unidades auxiliares, destacamentos o *verxillationes* de tropas realizarán las funciones señaladas.

Sabemos que a partir de Constantino (306-337 d.C.) se produce en el Imperio Romano un incremento de la circulación de oro acuñado. Las vías del noroeste registran en esta época lo que parece una reactivación de las comunicaciones. Sin embargo no sabemos casi nada acerca de las explotaciones en las zonas del noroeste, si es que se realizaron. Las fuentes literarias tardías que se refieren a ellas han de considerarse como tópicos y, por otro lado, el incremento del oro-moneda puede deberse a la confiscación de los tesoros acumulados en los templos y a la exigencia de hacer efectivo el pago de los impuestos en oro por parte del fisco.

Implantación iónica de superficies

Al introducir átomos extraños en un material se producen cambios en la estructura y la composición que llevan a nuevas propiedades de la superficie. Esta técnica es cada vez más apreciada en la industria

Thomas Picraux y Paul S. Peercy

Los materiales exponen al medio su superficie. Los objetos están sometidos a corrosión y desgaste, a la acción de la luz y a la interacción con campos externos eléctricos y magnéticos. A medida que los componentes mecánicos y electrónicos se miniaturizan, la relación entre superficie y volumen aumenta cada vez más y, con ello, crece la importancia de las propiedades de superficie. A menudo, las propiedades eléctricas, mecánicas, ópticas o químicas que se desean para la superficie de un objeto entran en conflicto con exigencias de sus propiedades de volumen: bajo costo, alta resistencia o facilidad de fabricación.

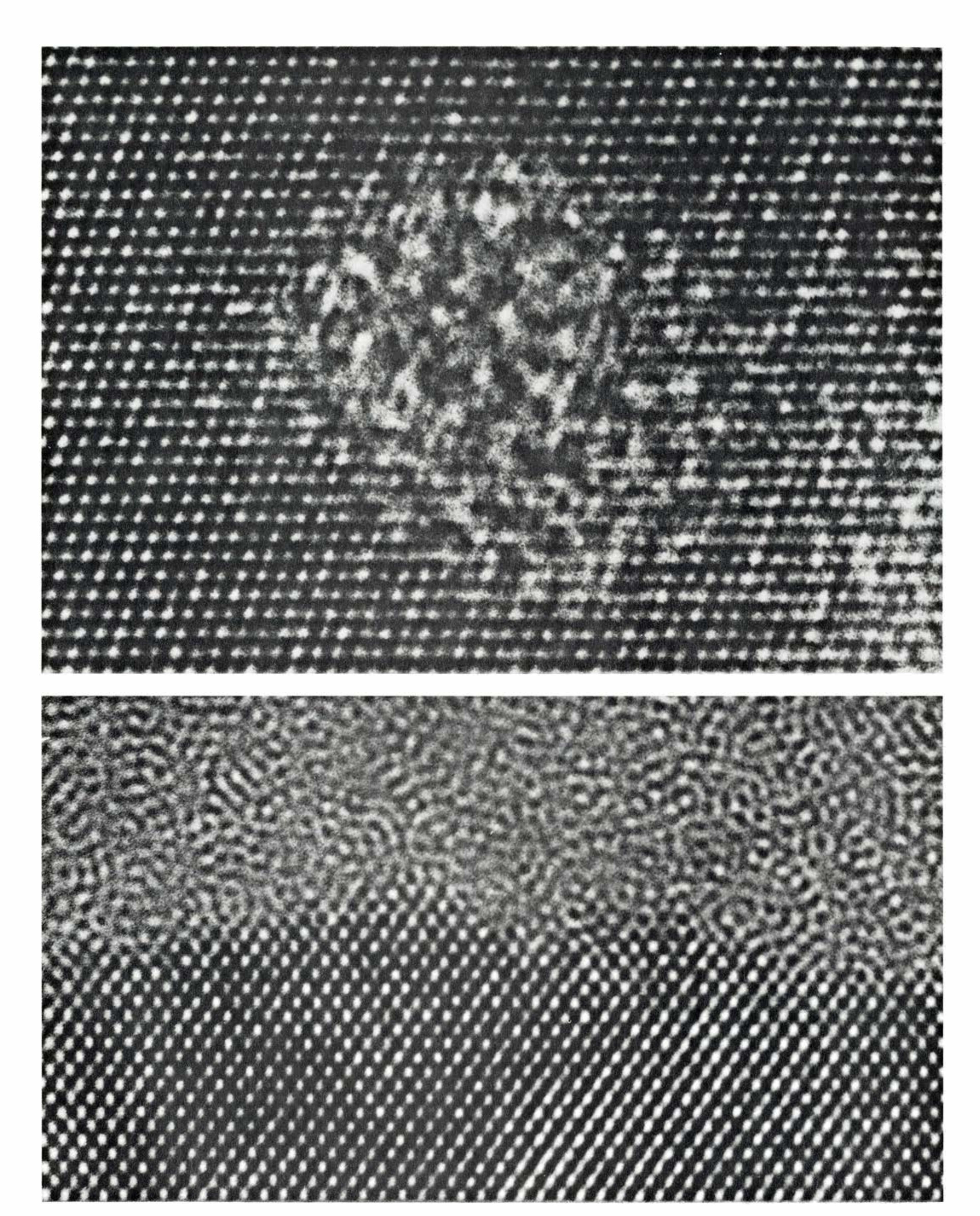
La técnica conocida por implantación iónica ofrece una libertad y un control sin precedentes para dotar a una superficie de rasgos independientes de las propiedades de volumen. Tras reducirla a un haz de iones y acelerarla electrostáticamente hacia la superficie de un material, una cantidad controlable de casi cualquier elemento químico puede mezclarse con el material matriz. Los átomos implantados se mezclan con los átomos del material matriz para formar una capa de un espesor del orden de una diezmillonésima de metro, a una profundidad predeterminada de la misma región superficial. Se obtienen así estructuras y composiciones especiales: pueden mezclarse metales que son inmiscibles en el estado líquido e introducir un material en otro a una concentración que nunca podría obtenerse a las altas temperaturas necesarias para mezclarlos. En virtud de ello, las propiedades superficiales se modifican, a veces de forma inesperada y ventajosa.

La implantación iónica se inició a primeros de los años 60, por la convergencia de vías de investigación procedentes de diferentes áreas de la ciencia. Los físicos estaban lanzando haces de partículas energéticas contra la materia en sus trabajos sobre colisiones atómicas y estructura de los núcleos. Los químicos nucleares, por su parte, andaban intentando determinar los cambios que ocurrían en la estructura cristalina de los sólidos cuando los núcleos radiactivos emitían partículas energéticas en el proceso de su desintegración. Mientras tanto, investigadores en el campo de la electrónica de semiconductores buscaban nuevas formas de contaminar ("dopar") el silicio, incorporando átomos de un elemento extraño en su estructura cristalina con objeto de modificar sus propiedades eléctricas. La miniaturización y el empeño puesto en construir circuitos integrados, con su secuela de transistores, diodos, resistencias y condensadores, en una simple pastilla requería un procedimiento más preciso para la introducción del contaminante que las dos técnicas entonces en uso: la exposición del silicio al contaminante en forma gaseosa o el revestimiento del silicio con una película de contaminante. Ambas técnicas se basaban en la difusión a alta temperatura de los átomos contaminantes a través del silicio, lo que resultaba en un perfil de concentraciones que cambiaban gradualmente con la profundidad.

Puesto que las operaciones eléctricas de los circuitos integrados se desarrollaban en capas muy finas, era necesario un método que ofreciese un control preciso sobre el número y profundidad de los átomos contaminantes. Usando haces de iones energéticos como los producidos por los físicos y los químicos para sus trabajos de investigación fundamental, los expertos en semiconductores advirtieron la posibilidad de introducir los contaminantes en silicio con la precisión necesaria. El proceso revolucionó la industria microelectrónica, abriéndole el camino al desarrollo y producción de dispositivos semiconductores de baja potencia y alta velocidad, comunes hoy en las sencillas calculadoras de bolsillo lo mismo que en refinadísimos ordenadores. Entre otros investigadores, nosotros hemos explorado las posibilidades del uso de haces de iones en la modificación de otros materiales (metales y materiales aislantes, como las cerámicas y los vidrios) y estamos constatando hasta qué punto la técnica tiene un futuro comercial esperanzador y como herramienta de la ciencia de materiales.

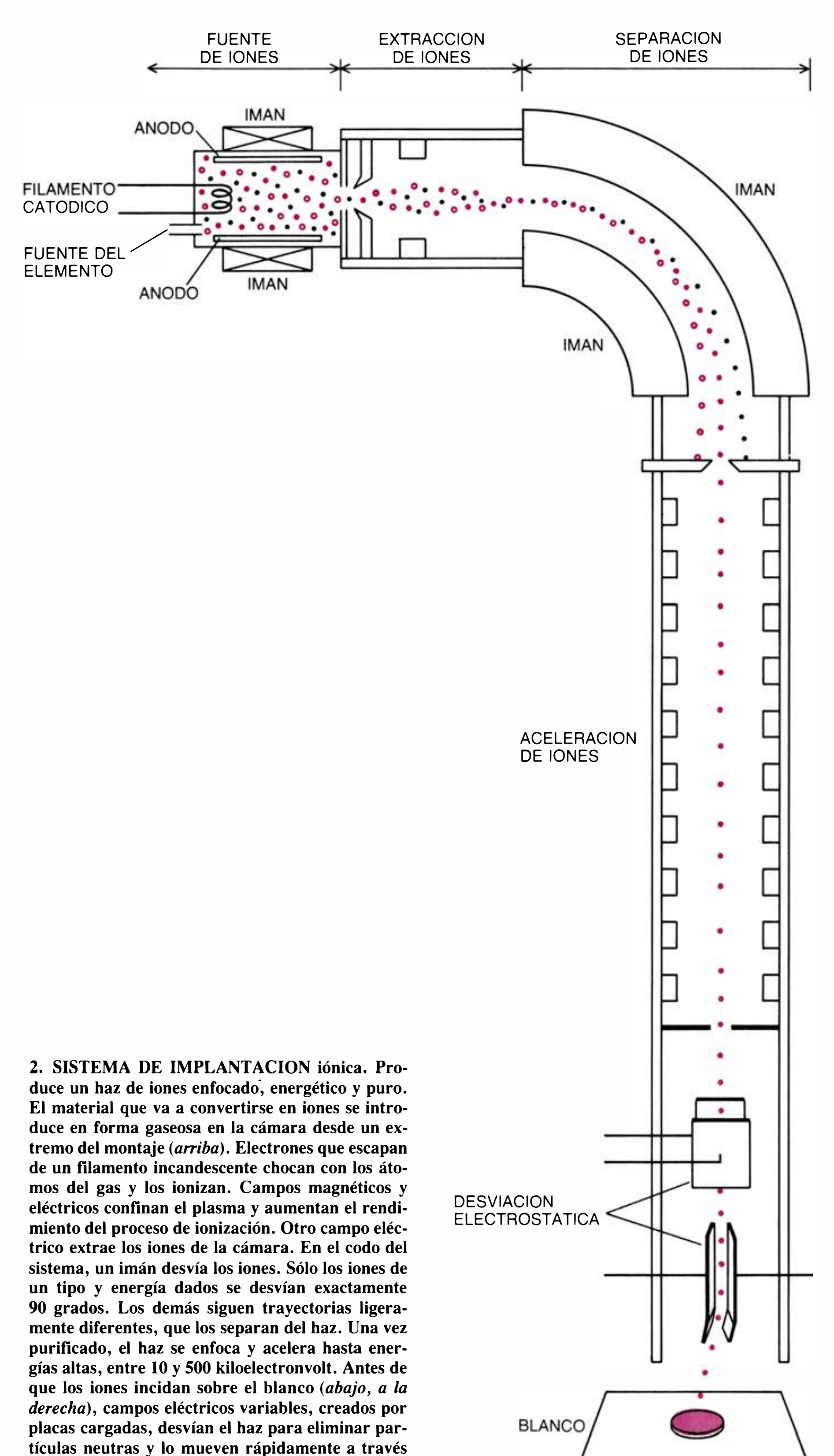
Aunque el objetivo es distinto, el montaje que exige el tratamiento de materiales por haces de iones difiere poco del empleado para investigar las interacciones nucleares. Los iones se producen en un extremo de un acelerador, en una cámara donde hay un filamento caliente del que escapan electrones que son acelerados en campos eléctricos. Si el elemento químico que va a ser ionizado existe en forma gaseosa, como ocurre con el argón o con el carbono (en la forma de dióxido de carbono), se introduce directamente ese elemento en la cámara. Allí, las colisiones con electrones de alta velocidad despojan al elemento de sus propios electrones, ionizando el gas y generando un plasma. Elementos químicos volátiles, piénsese en el estaño, se calientan en un horno que se comunica con la cámara del plasma donde entran vaporizados; los electrones energéticos ionizan entonces el vapor.

El proceso es más complejo para sólidos no volátiles. En este caso, se coloca una lámina del material en la cámara y se ioniza un gas, argón por ejemplo. Se comunica a la lámina una carga negativa, que así atrae entonces a los iones positivos del gas. Estos chocan contra la superficie del material, sacando directamente algunos átomos y calentando la superficie lo suficiente como para vaporizar otros átomos. Los átomos liberados se ionizan por colisiones con electrones.



1. ESTRUCTURAS CRISTALINAS TRANSFORMADAS, uno de los efectos de la implantación iónica. Estas micrografías del silicio, obtenidas por transmisión de electrones, fueron tomadas por J. Narayan, del Laboratorio Nacional estadounidense de Oak Ridge, con cuyo permiso la reproducimos aquí; muestran un corte de la red cristalina. Cada mancha blanca corresponde a una cadena de átomos de dicha red. El emborronamiento de la zona central de la fotografía superior revela la pérdida de la regularidad cristalina, producida cuando un ion de bismuto, acelerado a una energía de 100 kiloelectronvolt, penetró en la red. Si tal bombardeo continúa, el desorden se extenderá a toda la capa superficial implantada del cristal, que se transforma en estado amorfo. La fotografía inferior muestra la separación, nítida, entre una región amorfa y la estructura cristalina no perturbada subyacente. La textura veteada del silicio amorfo constituye un efecto del proceso fotográfico y no corresponde a la estructura atómica de la capa implantada con iones.

Un campo eléctrico extrae entonces el plasma de la cámara. La mayoría de las aplicaciones necesitan un haz iónico de gran pureza. Para conseguirlo, un imán que rodea el tubo desvía, cierto ángulo muy preciso, los iones deseados. Iones más ligeros se desvían con un ángulo mayor, fuera del camino del haz. Otros iones más pesados quedan también excluidos del haz, desviados en ángulos menores que los de los iones deseados. Una serie de campos eléctricos enfoca y acelera el rayo purificado hasta su energía final, dirigiéndolo hasta la cámara de implantación, donde incide sobre el blanco. Por ser estrecho el haz (su diámetro se extiende escasos centímetros), debe acometerse un barrido sobre la superficie del blanco para conseguir una implantación homogénea. En muchos casos, los electrodos que flanquean la entrada en la cámara de implantación determinan que el haz se mueva rápidamente de lado a lado; en otros, lo hace el blanco.



2. SISTEMA DE IMPLANTACION iónica. Produce un haz de iones enfocado, energético y puro. El material que va a convertirse en iones se introduce en forma gaseosa en la cámara desde un extremo del montaje (*arriba*). Electrones que escapan de un filamento incandescente chocan con los átomos del gas y los ionizan. Campos magnéticos y eléctricos confinan el plasma y aumentan el rendimiento del proceso de ionización. Otro campo eléctrico extrae los iones de la cámara. En el codo del sistema, un imán desvía los iones. Sólo los iones de un tipo y energía dados se desvían exactamente 90 grados. Los demás siguen trayectorias ligeramente diferentes, que los separan del haz. Una vez purificado, el haz se enfoca y acelera hasta energías altas, entre 10 y 500 kiloelectronvolt. Antes de que los iones incidan sobre el blanco (*abajo, a la derecha*), campos eléctricos variables, creados por placas cargadas, desvían el haz para eliminar partículas neutras y lo mueven rápidamente a través del blanco para obtener un tratamiento uniforme.

Cuando los iones penetran en el blanco, pierden energía por choques con los electrones y con los núcleos; se detienen rápidamente. La profundidad de penetración más probable, denominada recorrido proyectado, se calcula a partir del tipo y energía de los iones y de las características del material; para energías típicas del haz de entre 10 y 500 kiloelectronvolt, los recorridos proyectados varían entre 10 y 1000 nanómetros (billonésima parte del metro), según el tipo de ion y blanco. Por supuesto, no todos los iones quedan en reposo precisamente a una profundidad igual al recorrido proyectado. Por el contrario, su penetración forma una distribución que puede representarse como una curva de tipo campana centrada en el recorrido proyectado. La anchura de la curva, caracterizada por la desviación estándar de los recorridos alrededor del recorrido proyectado, se conoce como dispersión del recorrido.

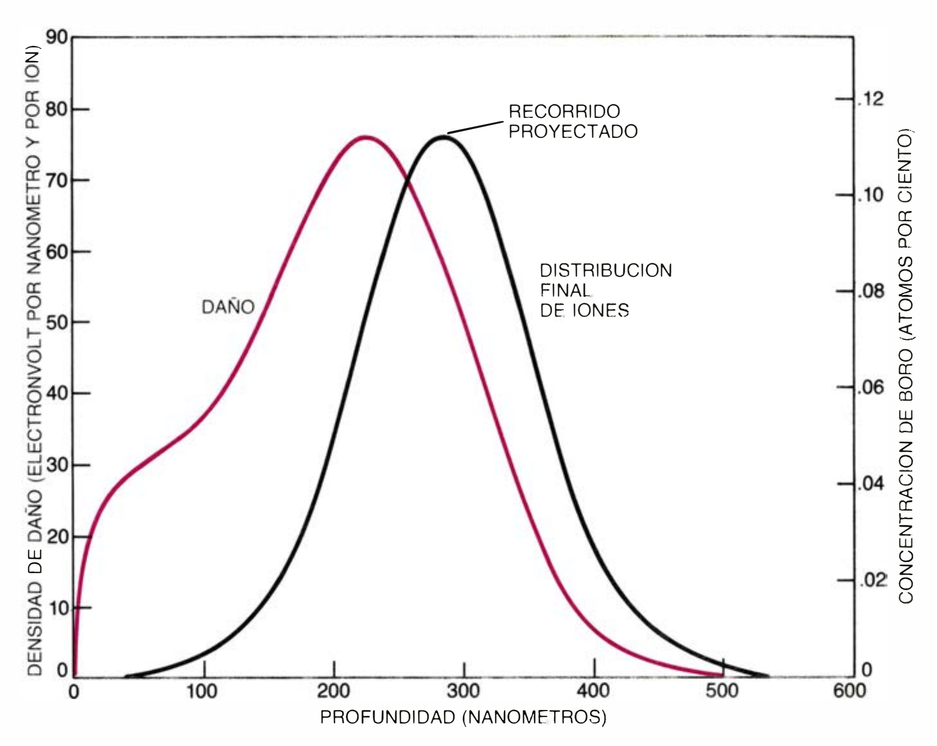
Es posible anticipar, y controlar, no sólo la distribución de profundidades de los átomos implantados, sino también la composición que producirán en el material matriz. El cálculo tiene en cuenta el flujo de iones en el haz, el número de átomos por unidad de volumen en el blanco y el tiempo de exposición. Supongamos que la composición de una región superficial de 100 nanómetros, que contenga 5×10^{22} átomos por centímetro cúbico, quiere modificarse en 10 partes por millón. Para un flujo del haz iónico de 10^{14} iones por centímetro cuadrado y por segundo, bastaría una exposición de una centésima de segundo por unidad de área. Un cambio de un 20 por ciento en la composición necesitaría unos 20 minutos de exposición por cada unidad de área. Para conseguir una distribución uniforme de átomos implantados en todo el espesor de la región tratada, la energía del haz iónico puede variarse de modo que las distintas curvas de distribución se sumen y den un perfil de distribución aproximadamente constante.

La intrusión violenta de átomos extraños en la red de un material cristalino daña la red en varios sentidos. Atomos del material matriz son desplazados de sus posiciones en la red, dejando huecos o vacantes. Atomos desplazados e iones implantados pueden acomodarse entre los planos atómicos de la matriz como intersticiales. Tales defectos puntuales, si se acumulan, forman aglomerados de vacantes o de intersticiales. En un solo plano atómico puede coincidir una gran cantidad de defectos y constituir un aglomerado plano conocido por bucle de dislocaciones. Al aumentar el daño, estos bucles crecen y se entrecruzan formando redes de dislocaciones.

El desorden que se produce en la red cristalina se conoce como daño de desplazamiento o daño por radiación. El causado a lo largo de la trayectoria de un ion se denomina cascada de colisiones. Cuando ion y átomos de la matriz tienen número atómico alto, el daño crece rápidamente; se acumula con mayor lentitud cuando el material y los iones poseen núcleos más ligeros. Como regla general, a medida que penetra un ion, desplaza un átomo por cada plano atómico. Un tratamiento por iones suficiente para cambiar en un 1 por ciento la composición de una capa desplazará normalmente varias veces cada átomo que se encuentre dentro de la zona implantada.

En algunos casos, el daño por desplazamiento produce cambios útiles en las propiedades eléctricas o mecánicas. Pero normalmente el daño por radiación y sus efectos son perjudiciales. En semiconductores, los átomos contaminantes que se sitúan en posiciones intersticiales entre planos atómicos no pueden ejercer su papel de donantes o aceptadores de electrones; por su parte, las vacantes interfieren la actividad del semiconductor capturando electrones o cargas positivas. El conseguir propiedades óptimas requiere que los iones contaminantes se incorporen en la red cristalina y que desaparezcan las vacantes.

Muchos defectos puntuales son móviles y tienen una vida corta a temperatura ambiente. Pero los aglomerados de defectos y los bucles de dislocaciones, normalmente estables, deben eliminarse mediante un recocido, es decir, calentando el material para inducir el reordenamiento de los átomos hacia la configuración, energéticamente más favorable, de la red cristalina bien ordenada.

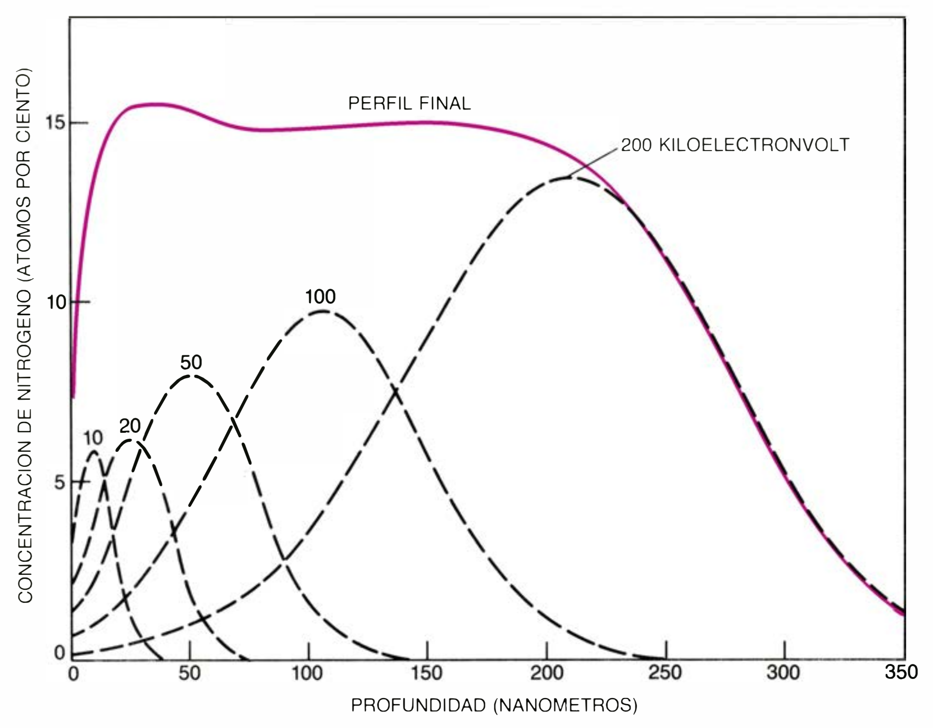


3. DISTRIBUCION DE PROFUNDIDADES de iones implantados con energía uniforme; adquiere la forma de una curva normal (*curva negra*). La profundidad correspondiente al máximo de la curva, o recorrido proyectado, varía con la energía del haz y con el tipo de iones y de material matriz. Las colisiones que detienen a los iones incidentes también desplazan átomos, dañando la estructura cristalina del material matriz. Los choques ocurren a profundidades menores que aquellas a las que los iones acaban alojándose. La curva de color muestra la distribución del daño, expresada en electronvolt de energía absorbida por colisiones atómicas en cada nanómetro de espesor de material por ion incidente. Las curvas corresponden a silicio implantado con un total de 10^{15} iones de boro por centímetro cuadrado de superficie. El haz usado en el proceso de implantación tenía una energía de 100 kiloelectronvolt.

El proceso que consiste en uno o varios intervalos de implantación iónica, seguidos de recocido para incorporar los átomos contaminantes a la red cristalina del silicio, se ha convertido en una etapa más de la fabricación de circuitos microelectrónicos. El fundamento eléctrico de tales dispositivos es la unión entre regiones semiconductoras que difieren en sus propiedades eléctricas. Una región contiene átomos contaminantes que liberan electrones fácilmente, ayudando a la conductividad eléctrica; su actividad se conoce como de tipo-*n*, o conductividad negativa. La región adyacente contiene un elemento contaminante diferente, cuyos átomos fácilmente aceptan electrones del material matriz, dejando huecos cargados positivamente en el mar de electrones del material matriz. Los huecos son móviles, dando lugar a conductividad de tipo *p*, o positiva. La unión de regiones con actividad eléctrica de tipos *n* y *p* crea un campo eléctrico, vital para la operación de los circuitos semiconductores.

Haces de iones proporcionan los contaminantes. Para promover actividad de tipo *n* en el silicio se recurre al fósforo arsénico, en tanto que se usa el boro para actividad de tipo *p*. Antes de cada intervalo de tratamiento por iones, el silicio es revestido con una capa de un material sensible a la luz o a los electrones. Se emplean entonces técnicas de litografía por haz de electrones o fotolitografía para transferir el circuito patrón a la mascarilla. Por medio de sustancias químicas se pelan las áreas expuestas, dejando el resto de la superficie protegida de los iones. Después de la implantación, se calienta la pastilla entre 600 y 1000 grados Celsius para recocerla.

Con este proceso básico bien establecido, los investigadores están explorando la tecnología de haces de iones para aplicarla a nuevas generaciones de dispositivos semiconductores. El proceso de fabricación de circuitos integrados *A Muy Gran Escala* (VLSI, *Very Large Scale Integrated*) que se halla en fase de desarrollo suprime, por ejemplo, la etapa de enmascaramiento. El establecer la densa y detallada circuitería que se necesita para la integración a gran escala exige una resolución cercana a los límites de precisión de los haces electrónicos o de luz visible. Haces de iones, enfocados de forma



4. CONCENTRACION UNIFORME DE IONES en una capa superficial. La conseguiremos variando la energía del haz implantado, así como el número de iones emitidos para cada energía del haz. Cada curva en línea discontinua representa la distribución en profundidad de los iones nitrógeno implantados en hierro, para una determinada energía del haz. En los tratamientos subsiguientes aumentamos la energía del haz y el número de iones implantados. La curva continua de color, que representa la suma de los perfiles de concentración individuales, muestra que el tratamiento por pasos produjo una concentración uniforme desde justamente debajo de la superficie hasta unos 200 nanómetros de profundidad.

muy precisa, ofrecen una resolución mucho mayor; haces iónicos podrían emplearse directamente, en principio, sin los pasos intermedios de enmascaramiento, para contaminar regiones de tamaño inferior a un micrometro, cuya actividad eléctrica pudiera ser controlada por unos 100 átomos sólo.

Otra nueva técnica, la de compuestos semiconductores, necesitará procesos de recocido más complicados. Tales semiconductores posibilitarán el advenimiento de circuitos más rápidos. No consisten en un elemento simple, sino en uno compuesto (arseniuro de galio), a través del cual se mueven rápidamente los electrones y los huecos positivos. Dentro de la estructura cristalina de la matriz, los dos (o más) elementos forman subredes que se interpenetran y cada elemento debe ser devuelto a su subred respectiva después de los desplazamientos atómicos resultantes de la implantación iónica. El recocido puede complicarse adicionalmente cuando uno de los elementos es volátil, como el arsénico. Durante un recocido largo algunos de estos átomos pueden escapar, estropeando las proporciones químicas del semiconductor y alterando sus propiedades eléctricas. Entre las técnicas que prometen superar esta dificultad citaremos el uso de capas protectoras para retener el elemento más volátil, el recocido rápido a alta temperatura usando pulsos ópticos y el recocido en una atmósfera sobresaturada en el elemento volátil.

Está emergiendo la posibilidad de usar haces de iones no sólo en el tratamiento de un semiconductor para darle un tipo específico de actividad eléctrica, sino también para producir un nuevo medio semiconductor. Por ejemplo, la microminiaturización que acompaña al desarrollo de los dispositivos VLSI requiere que la actividad eléctrica esté confinada en capas semiconductoras extremadamente finas y que se minimice la interferencia eléctrica entre elementos adyacentes en un circuito integrado. Una manera de conseguirlo es crear circuitos en un medio conocido por "Silicio sobre aislante" (SOI, de *Silicon-On-Insulator*), en el cual una capa de silicio de una anchura aproximada de medio micrometro reposa sobre un sustrato aislante. Los circuitos SOI necesitarían menos potencia que los actuales diseños de circuitos, trabajarían más rápido y serían menos sensibles a la radiación (una consideración importante en aplicaciones espaciales y militares). Ofrecen, a su vez, una mayor resistencia que otros circuitos miniaturizados al enclavamiento, proceso de ruptura en el que fluye corriente entre transistores vecinos.

La dificultad de obtener capas monocristalinas de silicio suficientemente finas ha retrasado la adopción de la tecnología SOI. La implantación iónica evita el problema. Al implantar iones oxígeno en un cristal de silicio bajo condiciones apropiadas puede crearse una capa de dióxido de silicio, un aislante. Una regulación cuidadosa de la energía del haz y de la temperatura del silicio hace posible crear una región aislante, no en la superficie del cristal de silicio, sino medio micrometro por debajo de ella. Entonces se pueden fabricar los elementos de los microcircuitos en la película resultante de silicio inalterado y aislado eléctricamente.

En semiconductores, la implantación iónica se usa de forma exclusiva para modificar las propiedades eléctricas. En metales, los cambios en las propiedades mecánicas y químicas prometen ser de primera importancia. Los cambios son valiosísimos porque no ocurren a costa de alterar las dimensiones o las propiedades de volumen y las superficies modificadas no experimentan los problemas de adhesión que a menudo infestan a los revestimientos superficiales.

Una superficie implantada con iones puede transformar un metal, aumentando su dureza y su resistencia al desgaste, a la oxidación y a la corrosión, rebajando su coeficiente de fricción y modificando una gama entera de propiedades: su comportamiento magnético, superconductor y óptico. Mientras que basta una concentración de contaminante de unas pocas partes por millón para promover actividad eléctrica de tipo *n* o *p* en semiconductores, cambios significativos en las propiedades superficiales de un metal necesitan normalmente que la concentración de iones implantados sea de varios átomos por ciento. La modificación de las propiedades en un área de utilidad práctica en un metal requiere largos tiempos de exposición o un acelerador capaz de producir un gran flujo de iones.

El desgaste es la propiedad que ha recibido más atención entre las propiedades susceptibles de ser controladas mediante haces de iones. Es ésta una elección lógica, ya que la mayoría de los procesos importantes que controlan el desgaste se desarrollan en el micrometro más externo del material, que es la región afectada directamente por la implantación iónica. Además, muchos tratamientos tradicionales para mejo-

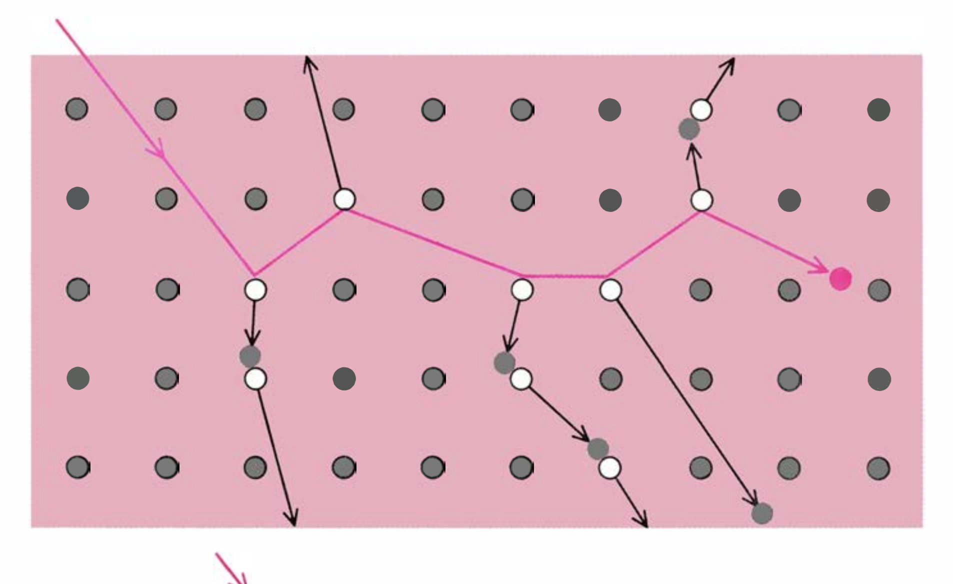
rar la dureza superficial y la resistencia al desgaste optan también por introducir elementos extraños en la región superficial del material. Uno de tales tratamientos es la nitrogenación del acero, usada comúnmente en las superficies de cojinetes, piezas de válvulas y revestimientos de cilindros en motores y en otras partes cuyo uso necesita una superficie dura. Para nitrogenarlo, se calienta el objeto a unos 500 grados Celsius en una atmósfera rica en nitrógeno, normalmente en forma de amoníaco. El nitrógeno se difunde hacia dentro de la superficie donde reacciona con el hierro para formar precipitados de nitruro, pequeños cristales de compuestos de nitrógeno dentro de la estructura cristalina del acero.

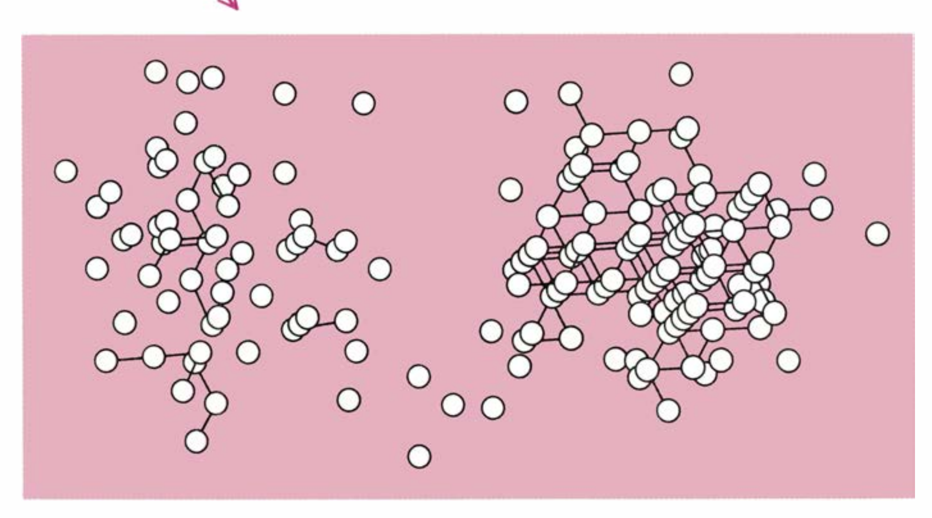
Geoffrey Dearnaley y sus colaboradores en Harwell, Inglaterra, fueron los pioneros en la introducción de nitrógeno por medio de haces iónicos en vez de por difusión; otros grupos han ampliado su trabajo. El suministro de iones nitrógeno en grandes cantidades con un acelerador de iones resulta más fácil que para otros iones, ya que el nitrógeno existe en forma gaseosa y se ioniza fácilmente. En consecuencia, un tratamiento razonablemente corto produce una composición entre un 20 y un 40 por ciento de nitrógeno, necesaria para mejorar la dureza superficial y la resistencia al desgaste. Los iones nitrógeno implantados se incorporan individualmente en la red cristalina, y en cuyo caso se dice que forman una disolución sólida, o bien forman nitruros, dispersos en precipitados de pequeño tamaño.

Tests en los que un disco de acero implantado rota bajo una aguja de acero en contacto con la superficie y sometida a una carga ajustable muestran que el desgaste disminuye en un factor de hasta 10 con respecto al acero no tratado. Con todo, el grado de mejora varía con la composición elemental del acero, su tratamiento térmico previo y su estructura cristalina; cojinetes de acero muy duros, por ejemplo, no experimentan mejoras en absoluto. Por otra parte, en algunos aceros la nitrogenación e implantación, combinadas, pueden incluso llevar a mejora más espectaculares.

El aumento en la resistencia al desgaste no está del todo dilucidado en el plano atómico. La introducción de átomos extraños en la red cristalina interrumpe la regularidad de la estructura cristalina del acero. Esta ruptura quizás aumentara la dureza del acero ayudándole a resistir el movimiento de las dislocaciones, en que los esfuerzos superficiales hacen que capas atómicas individuales se deslicen una sobre otra, átomo a átomo. Ahora bien, la velocidad de desgaste refleja no sólo la dureza de una superficie, sino también los mecanismos específicos de desgaste, en muchos casos apenas desentrañados, tales como la abrasión y la adhesión.

Se supone que en otros metales la implantación de nitrógeno cambia el mecanismo dominante de desgaste. La implantación de nitrógeno frena el desgaste de capas de blindaje de cromo hasta 100 veces. La implantación de nitrógeno expande, presumiblemente, la capa de cromo y cierra grietas, consideradas los puntos débiles por donde comienza el desgaste. También ocurren mejoras drásticas en un material conocido como Ti-6Al-4V, una aleación de titanio que contiene un 6 por ciento de aluminio y un 4 por ciento de vanadio, y que se usa en estructuras aeroespaciales. En los experimentos, superficies implantadas con nitrógeno y no lubricadas se desgastaron 1000 veces más despacio que superficies no tratadas. También se redujo la fricción a un tercio de su nivel normal. El nitrógeno implantado promueve la formación de una capa superficial de óxido que parece actuar como lubrificante. La lubrificación ralentiza el proceso de desgaste de dos superficies en fricción.

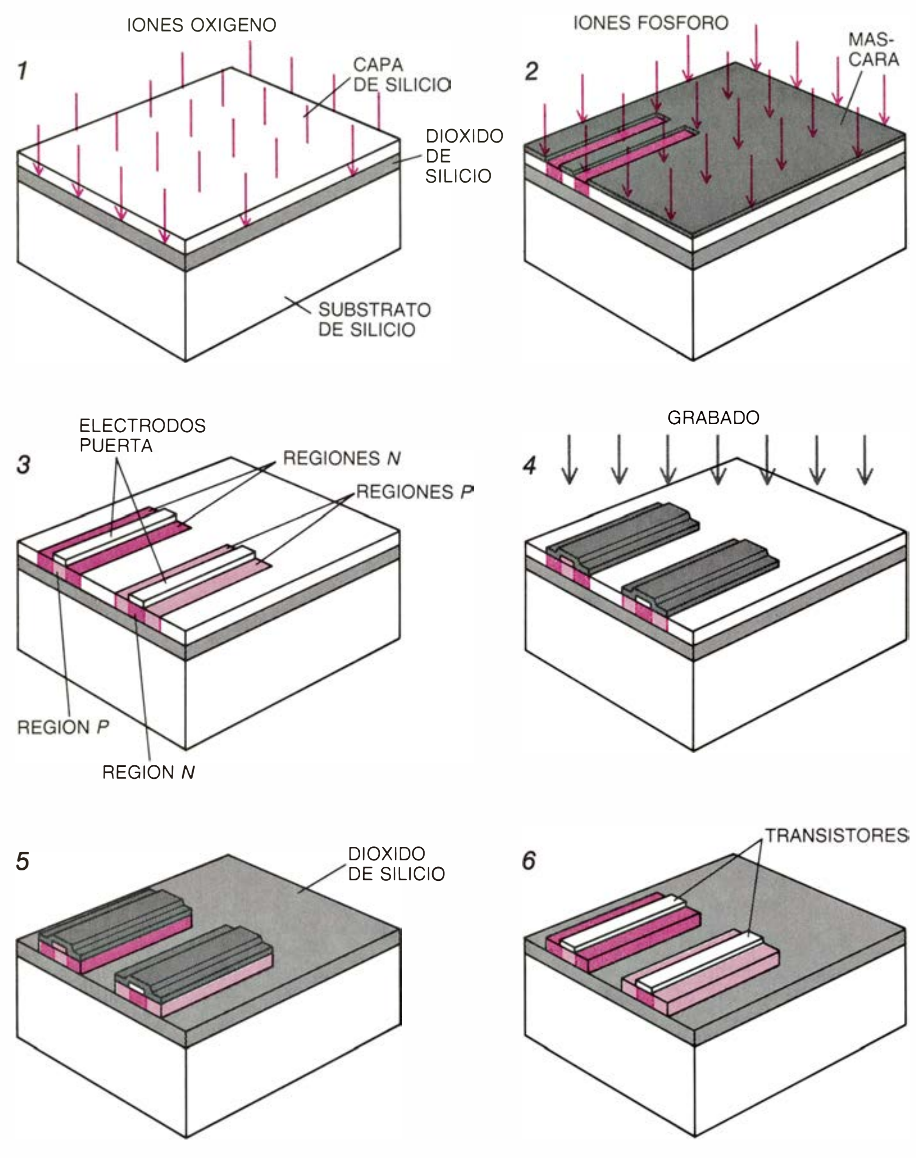




5. DAÑO producido en la estructura cristalina del material matriz. Consiste en dos formas básicas, como se muestra esquemáticamente en la figura superior. Algunos átomos del material matriz son desplazados de su posición por cada ion energético, dejando vacantes (*círculos*); los átomos desplazados y los iones implantados prefieren alojarse entre los planos atómicos del cristal, como intersticiales. Cuando tanto el ion como el sustrato tienen núcleos pesados, un solo ion incidente puede producir un daño intenso. La figura inferior ilustra la distribución de vacantes que resulta al penetrar un ion molibdeno por la superficie de una aguja de tungsteno. Las líneas unen vacantes situadas en nudos adyacentes de la red cristalina. La flecha señala el punto aproximado de entrada del ion incidente. La distribución tridimensional fue trazada por Ching-Yen Wei y David N. Seidman, de la Universidad de Cornell, quienes usaron una técnica conocida como evaporación por campo para exponer sucesivas capas atómicas en la superficie del agua y formaron la imagen de la estructura de cada capa sirviéndose de la microscopía de campo iónico.

Otros casos de aumento en la resistencia al desgaste reflejan un cambio en la estructura del material. Investigadores de los Laboratorios Nacionales Sandia y del Laboratorio de Investigación Naval trataron acero inoxidable con haces de iones de carbono y titanio para obtener una aleación superficial que contuviera un 20 por ciento de cada elemento. El resultado fue que la región superficial del acero perdió su orden cristalino y cambió a un estado amorfo, una fase del acero que no puede obtenerse por otros medios. El coeficiente de fricción disminuyó en un 50 por ciento y su velocidad de desgaste bajó hasta unas diez veces.

Estos y otros procesos de implantación iónica para reducir la fricción y el desgaste en metales son ya atrayentes desde un punto de vista comercial. El interés se centra en el tratamiento de componentes críticos tales como cojinetes en motores de avión o en giróscopos, y de instrumentos de precisión para procesos industriales, en los que el coste de una pieza o el coste de detener la producción para reemplazarla hace que la longevidad sea un elemento crucial. Investigadores en los Estados Unidos, Inglaterra y en otros lugares han descubierto que la implantación de iones de nitrógeno alarga de dos a cinco veces la vida de herramientas hechas de acero y de carburo de tungsteno cementado por cobalto. Troqueles de precisión para plásticos sufren desgaste abrasivo por las fibras y las partículas minerales usadas como relleno en los plásticos. Estos responden incluso más espectacularmente al tratamiento por iones, decuplicando incluso su duración.

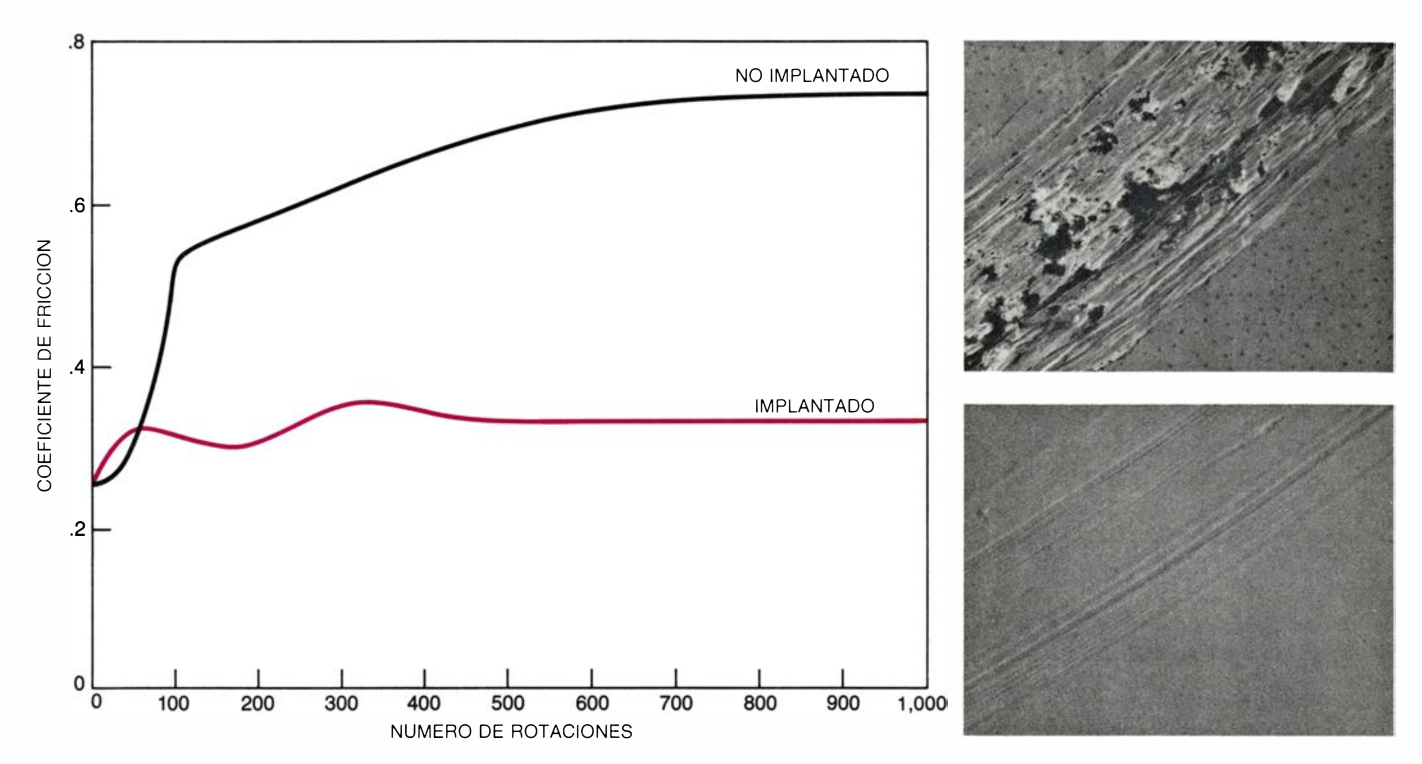


6. CIRCUITO DE SILICIO SOBRE AISLANTE (SOI), construido mediante un proceso que usa haces de iones. En un primer paso se bombardea un cristal de silicio con un haz de iones oxígeno. Los iones quedan en reposo bajo la superficie y se combinan con el silicio, formando una capa de dióxido de silicio, aislante (*1*). Después de un recocido del silicio para reparar el daño de desplazamiento producido en el cristal por el paso de los iones, se fabrican los circuitos en la fina película superficial de silicio aislado eléctricamente. Se recubre el silicio con una máscara fotosensitiva a la que se transfiere un diseño usando fotolitografía. Las regiones de la máscara expuestas a la luz se pelan mediante el ataque por un ácido, destapando así las áreas apropiadas del silicio para implantarlas con contaminantes ("dopantes") eléctricos, como el boro y el fósforo, para producir así actividad eléctrica de tipo *n* o *p*, respectivamente (*2*). Pasos repetidos de enmascaramiento y tratamiento con iones más la deposición de electrodos puerta sirven para formar elementos de un circuito, en este caso dos transistores (*3*). Se aplica de nuevo una máscara para proteger los transistores; el silicio inalterado de los alrededores se pela atacándolo con un ácido (*4*). Cada transistor tiene unos 500 nanómetros de espesor y una anchura de unos pocos micrometros; quedan como islas de silicio sobre el aislante de dióxido de silicio (*5*). Tras retirar la máscara (*6*), se forma un circuito completo interconectando un gran número de transistores que se han venido creando de esa misma manera.

Prótesis de la articulación de la cadera hechas de aleación de titanio, y cuya longevidad es crucial, pueden beneficiarse también de la implantación. En un medio de fluidos corporales el movimiento de la bola metálica de la articulación en el hueco de polietileno puede degradar severamente la articulación. Se ha comprobado que la implantación de nitrógeno puede frenar el desgaste de la aleación en contacto con polietileno en factores de hasta 1000.

Aquellas piezas cuya misión las expone al desgaste también sufren la corrosión. Troqueles usados en la formación de plásticos, por ejemplo, padecen el desgaste y el ataque por productos químicos residuales; la degradación de prótesis de cadera resulta de la corrosión por fluidos corporales, así como por desgaste. Investigadores en electroquímica han encontrado que la implantación de iones protege los materiales contra la corrosión y el desgaste. Al implantar 5×10^6 átomos de platino por centímetro cuadrado en acero inoxidable, se forma una capa superficial de aleación que defiende al acero contra el ataque por una disolución al 20 por ciento de ácido sulfúrico durante 80 días de inmersión. Aunque el platino es un metal precioso, la capa tratada es tan delgada que el coste del platino implantado es de sólo unas pocas diezmilésimas de dólar por centímetro cuadrado.

La modificación de superficies metálicas por implantación iónica parece hallarse en el umbral de una amplia comercialización, tanto en su forma convencional como en una técnica modificada conocida por mezclado por haz de iones. En este proceso, se deposita una película de material a partir de su vapor y simultánea o posteriormente la



7. REDUCCION EN LA FRICCION conseguida por implantación iónica. Las gráficas muestran el coeficiente de fricción (la fuerza necesaria para deslizar una superficie a través de otra, dividida por la fuerza con que las superficies se ejercen mutua presión) para dos placas de acero inoxidable que rotaron bajo una aguja de acero inoxidable sin lubrificación. Este estudio fue llevado a cabo por David M. Follstaedt, Larry E. Pope y sus colaboradores en los Laboratorios Nacionales Sandia. Una de las placas (*curva negra*) no se trató; la otra (*curva coloreada*) se bombardeó con iones de carbono y titanio, transformando la superficie del acero del estado cristalino en el amorfo. Después de unas 100 revoluciones, el coefiente de fricción de la superficie implantada se estabilizó en un valor menor que la mitad del valor correspondiente a la superficie no tratada. La disminución en la fricción retardó el desgaste del acero implantado. La superficie implantada, aumentada 500 veces en una micrografía electrónica de barrido (*fotografía inferior*), aparece uniforme, en contraste con el aspecto rugoso del acero no tratado en una micrografía electrónica similar (*arriba*). Como la foto anterior, ésta es propiedad de Sandia.

superficie se expone a un haz de iones. Las cascadas de colisiones mezclan el material depositado con el sustrato. Basta un pequeño número de iones para romper la frontera de separación entre la película y el sustrato, uniendo fuertemente el revestimiento. Una dosis alta de iones puede mezclar los constituyentes completamente, formando una aleación. Y ya que este proceso requiere una cantidad de iones menor que la necesaria para formar una capa de aleación por implantación normal, resulta, pues, más económico que la implantación tradicional.

La modificación por haces de iones está apenas empezando a colmar las esperanzas puestas en ella para el tratamiento comercial de superficies metálicas. Pero ha demostrado suficientemente su valía ya como instrumento de investigación. Se pueden usar haces de iones para simular esfuerzos físicos y químicos, permitiendo la observación de laboratorio de la respuesta que dan los metales. En el estudio de los mecanismos de corrosión, los investigadores han usado esta técnica para introducir especies particulares de iones en superficies metálicas en cantidad controlada, al objeto de determinar qué función desempeñan los distintos elementos químicos en la corrosión.

Se ha ensayado también con haces de iones para simular la radiación y el fuerte bombardeo por neutrones que se desarrolla en el interior de los reactores reproductores. En la década de 1970, los investigadores descubrieron que los neutrones producían un engrosamiento de los metales usados en el núcleo de reactores reproductores experimentales, aumentando su volumen en un pequeño tanto por ciento y entorpeciendo las tolerancias mecánicas. Se constató que los neutrones dejaban densas cascadas de desplazamiento. A las temperaturas de operación en reactores las vacantes se acumulaban para formar pequeñas cavidades en el metal. La investigación de aleaciones resistentes a tal hinchazón necesitaba un método para estudiarlas en el laboratorio. El bombardeo por iones, con su capacidad para producir el mismo tipo de daño mucho más rápidamente que los mismos neutrones, ofreció un método adecuado para estos fines.

Para evaluar los materiales destinados a las paredes internas de los dispositivos de plasma que se emplean en las investigaciones sobre fusión nuclear se ha recurrido también a los haces de iones. La exposición a un plasma caliente de hidrógeno corroe la mayoría de los metales: los iones chocan con los átomos de la superficie y les transfieren el suficiente impulso como para echarlos fuera del todo. Este proceso, conocido por "chisporroteo", puede hacer retroceder la pared del contenedor y contaminar el plasma. Los haces de iones proporcionan un medio de recrear el proceso en el laboratorio para identificar así aleaciones resistentes.

Ya que permite impregnar una superficie prácticamente con cualquier concentración de otro material, la implantación iónica ha demostrado ser un poderoso instrumento para investigar las interacciones entre los componentes de una aleación. Sólo a altas temperaturas suelen poder tomarse medidas precisas de la velocidad de difusión de elementos químicos extraños en un metal. Debido al control exacto que ofrece sobre la profundidad a la que los iones quedan en reposo, la implantación iónica produce una concentración mayor y un gradiente de concentraciones más pronunciado que los procedimientos habituales en la preparación de

aleaciones. En virtud de ello se da una difusión medible, evidenciada por un cambio en la distribución de profundidades de los átomos implantados, a temperaturas más cercanas a las que los metales se enfrentan en el uso diario.

La técnica de medida se basa en el hecho de que, para una determinada energía de implantación, la distribución en profundidades de los átomos implantados se mide con gran precisión. El primer paso consiste en la implantación de iones extraños. El perfil de profundidades de los átomos implantados se determina entonces por medio de la técnica llamada de dispersión de haces de iones. Se enfila un haz de iones de helio de alta energía hacia el metal; de aquéllos, una pequeña proporción chocará contra los núcleos y rebotará, con energías características de la masa de los núcleos golpeados. Ya que los iones de helio pierden energía a una velocidad conocida, a medida que van atravesando el metal, puede determinarse la profundidad a la que se desarrollan las colisiones. El perfil de profundidades de los átomos implantados se construye a partir del número de iones helio dispersados y de su energía.

Se calienta entonces el metal hasta una temperatura especificada durante un tiempo prefijado. Una vez enfriado, se le somete de nuevo a la dispersión de un haz de iones, lo que da lugar a un nuevo perfil de profundidades. La difusión que tuvo lugar al calentar el metal se reflejará en su ensanchamiento de la curva de distribución. El grado de ensanchamiento, así como el tiempo y la temperatura a la que éste ocurrió, permiten encontrar la velocidad de difusión con una precisión mucho mayor que la que ofrecen otros métodos.

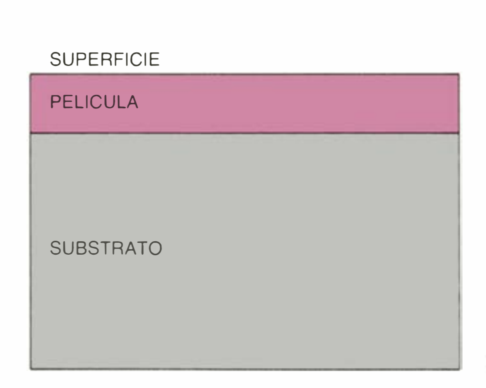
La extrema sensibilidad de esta técnica nos faculta para medir procesos de difusión lentos en un período de tiempo razonable. La fragilidad por revenido constituye un ejemplo de tales procesos; ocurre en piezas de acero, a temperaturas moderadas, cuando elementos indeseables como el antimonio, el estaño o el fósforo se acumulan en los contornos entre diferentes granos cristalinos del metal, y, por tanto, lo debilitan. La implantación iónica permite observar y caracterizar en el laboratorio la migración y atrapamiento de elementos extraños, a las temperaturas habituales de exposición de los metales.

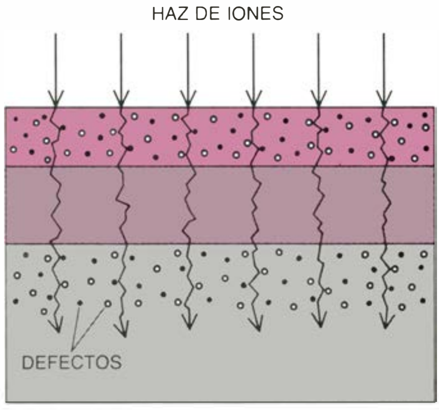
Samuel M. Myers, Jr., y sus colaboradores, de los Laboratorios Sandia, han demostrado que la implantación iónica ayuda también a abordar otro fenómeno metalúrgico: la solubilidad sólida. Esta técnica permite a los investigadores introducir un número preciso de átomos de soluto en un metal a baja temperatura. Cuando la concentración del elemento extraño excede su solubilidad, los átomos que ya no pueden acomodarse dentro de la red cristalina del metal matriz comienzan a formar precipitados. La determinación del perfil de profundidades de los átomos implantados por dispersión de haz de iones, combinada con la detección de precipitados usando microscopía electrónica, permite medir la solubilidad sólida del elemento implantado a una temperatura bastante baja. Tal información es preciosa para desarrollar nuevas aleaciones, ya que los distintos elementos de éstas producirán efectos muy diferentes sobre las propiedades de los metales según se incorporen formando una disolución o bien precipitados.

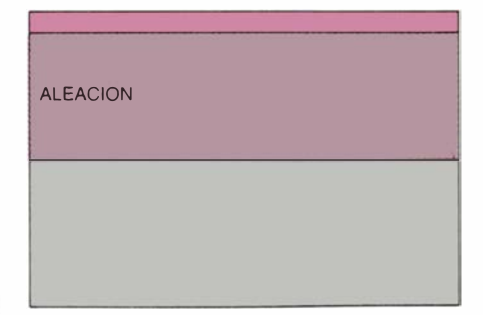
A medida que las nuevas tecnologías demanden nuevos materiales y pongan nuevas exigencias a los antiguos, emergerán nuevos usos de la implantación iónica. La implantación iónica está ahora mostrando su potencial como un medio de preparación cabal de superficies de materiales aislantes: vidrios, cerámicas y polímeros. Entre las técnicas específicas en las que puede desempeñar un papel están las de guías de ondas ópticas, memorias de burbujas magnéticas, cerámicas ferroeléctricas, cerámicas de alta temperatura para motores y polímeros con superficies conductoras.

Por ejemplo, en guías ópticas hechas de vidrio de sílice, la implantación de iones nitrógeno causa daño por radiación y forma precipitados de nitruro de silicio. Ambos efectos ayudan a confinar la luz dentro de la guía óptica, al cambiar el índice de refracción de las capas superficiales. Iones hidrógeno, implantados en granates usados para memorias de burbuja magnética, causan daño por desplazamiento, pues cambian las propiedades magnéticas intrínsecas del material. Las regiones implantadas sirven para confinar las burbujas en caminos de propagación particulares en memorias de alta densidad.

La implantación iónica mejora también las propiedades de cerámicas ferroeléctricas, que son cerámicas fotosensitivas que graban imágenes cuando se exponen simultáneamente a una luz intensa cercana al ultravioleta y a un campo eléctrico. El daño por radiación y los cambios químicos resultantes del bombardeo con iones de aluminio y argón llevan a cambios en el comportamiento eléctrico que aumentan la fotosensitividad del material en un factor







8. MEZCLA POR BOMBARDEO IONICO: reduce el número de iones necesarios para formar una capa superficial de aleación. La sustancia que originará una aleación con el metal matriz se aplica en forma de película superficial (*izquierda*) mediante deposición del vapor. Iones acelerados, el nitrógeno por ejemplo, aportan la energía necesaria para mezclar las sustancias (*centro*). El mezclado se desarrolla conforme los iones incidentes chocan con átomos de la película y del sustrato, desplazándolos. La excitación de átomos en la región implantada y los defectos creados por el bombardeo en la estructura cristalina inducen la migración de átomos. Los átomos se mueven para llenar vacantes en la red (*círculos*) y acomodar átomos desplazados (*puntos negros*) dentro de la estructura cristalina. Un bombardeo intenso puede ensanchar la región mezclada y hacer que ésta se aproxime hasta la superficie (*derecha*).

de más de 10.000. Los tratamientos cambian también la fotosensitividad hacia la región visible del espectro. Cerámicas implantadas pueden grabar imágenes fotográficas al sol o en luz blanca usando tiempos de exposición razonables. En otras cerámicas, la implantación altera las propiedades mecánicas. A pesar de su dureza, sustancias tales como el diboruro de titanio y la alúmina son bastante frágiles, lo que explica su uso limitado. Investigadores del Laboratorio Nacional de Oak Ridge acaban de demostrar que la implantación de ciertos iones endurece las regiones superficiales de tales cerámicas.

Quizás el último añadido a la lista de los materiales en los que se ha explorado los efectos de la implantación iónica sean los polímeros. La mayoría de los polímeros se caracterizan por sus propiedades aislantes; ahora bien, implantados, su conductividad sube hasta 14 órdenes de magnitud, llegando a niveles comparables a los del grafito. Se sospecha que el cambio de conductividad refleja cambios en la estructura molecular del polímero y un aumento drástico en su contenido en carbono, que se produce a medida que se rompen los enlaces que ligan el carbono a otros elementos volátiles, liberando así a dichos elementos volátiles. Una amplia gama de polímeros pueden convertirse en conductores por implantación. La técnica permitirá, así cabe esperarlo, utilizar polímeros para los empalmes eléctricos que unen elementos en un circuito microelectrónico. Un polímero transformado en conductor por implantación puede sustituir también a los metales en defensas designadas para proteger de interferencias electromagnéticas, los instrumentos sensibles.

Es muy pronto para decir cuál de las múltiples aplicaciones de la implantación iónica que se divisan cristalizará en un éxito comercial. Cierto experto en ciencia de materiales bautizó a algunas tecnologías de haces de iones como "soluciones en busca de un problema". Dado el poder de esta técnica, su papel en la industria del futuro, aunque difícil de predecir, será notable. Aun cuando no se destinara para modificar superficies directamente en procesos comerciales, la implantación iónica afectará indirectamente a los materiales disponibles y a su uso, pues los estudios por haces de iones en el laboratorio van desentrañando las propiedades fundamentales que caracterizan a los materiales.

Química del ajo y la cebolla

Ciertos compuestos azufrados constituyen la base del olor del ajo y de las lágrimas que se producen al cortar cebolla. A esos compuestos se deben las propiedades terapéuticas atribuidas desde antiguo a uno y a otra

Eric Block

La humanidad se ha dividido desde siempre en dos grupos: el de aquellos a los que les gusta el ajo y las cebollas y el de los que los detestan. Entre los primeros hemos de incluir a los faraones de Egipto, a quienes enterraban con cerámicas y tallas de madera de ajos y cebollas para asegurar que sus comidas de ultratumba estuvieran bien sazonadas. A los judíos, que vagaron durante 40 años por el desierto del Sinaí añorando "el pescado que tan abundantemente comíamos en Egipto y las calabazas y melones, y los puerros, ajos y cebollas". Y también a Sidney Smith, el ensayista del siglo pasado, cuyo "Recetario de ensaladas" contenía este pareado: "Unos pellizcos de cebolla sigilosos animan la olla".

En el grupo de los que aborrecen ajos y cebollas se inscriben los sacerdotes egipcios, quienes, según Plutarco, "se abstenían de la cebolla... No era buena ni para los días de ayuno ni para las celebraciones festivas, ya que, en un caso produce sed y en el otro hace llorar a los que la toman". También habría que mencionar a los griegos, que consideraban vulgar el olor del ajo y de la cebolla y prohibían a los que comían estos alimentos asistir a los cultos en el templo de Cibeles. Y a Bottom, quien en *El sueño de una noche de verano* aconseja a su compañía de actores "no comer ajos ni cebollas, pues debemos exhalar un fresco aliento".

Por razones profesionales, a los químicos hay que incluirlos entre los partidarios. Desde siempre les han atraído las sustancias de olor fuerte, sabor picante y efectos fisiológicos llamativos. Las investigaciones químicas realizadas a lo largo de una centuria han demostrado que, al cortar un bulbo de cebolla o ajo, se liberan ciertas moléculas orgánicas de bajo peso molecular que contienen átomos de azufre unidos de una forma raramente encontrada en la naturaleza. Estas moléculas, muy reactivas, se transforman espontáneamente en otros compuestos orgánicos azufrados que participan en transformaciones ulteriores. Además, presentan múltiples efectos biológicos. La virtualidad lacrimógena de las cebollas es sólo una muestra. Ciertos extractos de ajo y cebollas tienen propiedades antibacterianas y antifúngicas. Otros extractos son antitrombogénicos, es decir, inhiben la agregación de la proteína fibrina con las plaquetas de la sangre (formación de trombos), impidiendo su coagulación.

Los ajos y cebollas pertenecen a la familia de las liliáceas. Sus nombres sistemáticos son *Allium sativum* y *Allium cepa*. ("Allium" probablemente proceda del céltico *all*, picante.) Ambos se encuentran entre las plantas cultivadas más antiguas: sus orígenes, muy posiblemente allá por el Asia Central, anteceden a la historia escrita. Durante miles de años han formado parte de la medicina popular. El Codex Ebers, un papiro médico egipcio de alrededor de 1550 a.C., contiene más de 800 fórmulas terapéuticas, de las que 22 mencionan el ajo como un remedio eficaz para diversas dolencias: cardiopatías, cefalalgias, mordeduras, lombrices intestinales y tumores, entre otros.

Además de los egipcios, Aristóteles, Hipócrates y Aristófanes recomendaron el ajo por sus efectos medicinales. El naturalista romano Plinio el Viejo registra numerosos usos terapéuticos del ajo y las cebollas. Dioscórides, médico jefe de las legiones romanas en el siglo I de nuestra era, prescribía el ajo como vermífugo, para expulsar las lombrices intestinales. Y se cuenta que durante los primeros juegos olímpicos en Grecia los atletas ingerían ajos como estimulantes.

En la India se ha utilizado el ajo en lociones antisépticas para lavar heridas y úlceras. En China se ha recomendado desde antiguo el té de ajo para la fiebre, cefalalgias, cólera y disentería. La medicina popular se entremezcla con frecuencia con leyendas, como en el caso del Vinagre de los Cuatro Ladrones. Según cuenta la historia, en 1721 cuatro ladrones que sufrían condena fueron obligados a enterrar a las víctimas de una terrible epidemia en Marsella, resultando inmunes a la enfermedad. El secreto de esta inmunidad consistía en que bebían un brebaje hecho de ajo macerado en vino, que inmediatamente ganó fama con el nombre de *vinaigre des quatre voleurs*, y que aún se puede encontrar hoy en Francia.

Además de estas recetas populares existen recomendaciones más contemporáneas de las virtudes del ajo y las cebollas. Por una parte, se les ha considerado como antibióticos suaves. En 1858 Louis Pasteur indicaba que el ajo era antibacteriano. Y más recientemente, Albert Schweitzer utilizaba, al parecer, el ajo en Africa para tratar la disentería por amebas. En las dos guerras mundiales el ajo se empleó como antiséptico para prevenir la formación de gangrena. Diversas investigaciones de laboratorio han demostrado que el jugo de ajo diluido 125.000 veces inhibe el crecimiento de bacterias de los géneros *Staphylococcus, Streptococcus, Vibrio* (incluido el *V. cholerae*) y *Bacillus* (incluidos *B. typhosus, B. dysenteriae* y *B. enteritidis*). El jugo de ajo, además, posee un amplio espectro de actividad frente a hongos zoopatogénicos y muchas estirpes de levaduras, sin descontar algunas que causan vaginitis.

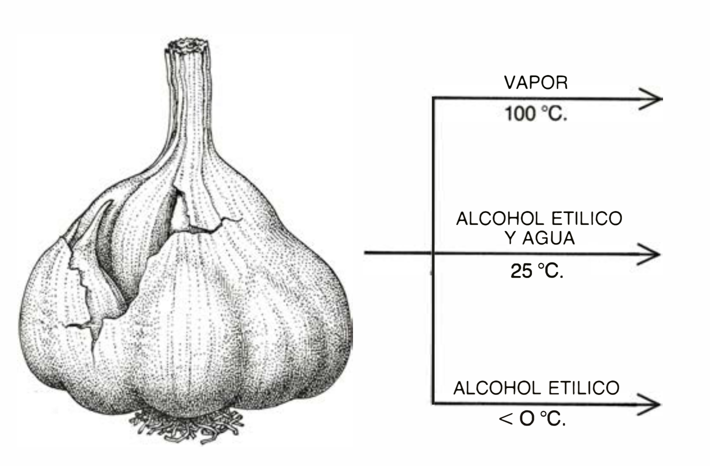
En otro sentido, el ajo y las cebollas parecen tener propiedades antitrombogénicas. También en este caso las pruebas son antiguas y recientes. En Francia se alimentaban con ajos y cebollas a los caballos que tenían coágulos en las patas. Modernamente, en 1979, el equipo de investigadores presidido por G. S. Sainani, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Poona (India), ha publicado los resultados de un estudio epidemiológico entre tres

grupos que consumían diferentes cantidades de cebollas y ajos. Los sujetos estudiados eran vegetarianos de la comunidad Jain de la India que comían ajos y cebollas en grandes cantidades (como mínimo unos 50 gramos de ajo y 600 gramos de cebolla a la semana), en cantidades menores (no más de 10 gramos de ajo y 200 gramos de cebolla a la semana), o que nunca en su vida habían comido ajos ni cebollas.

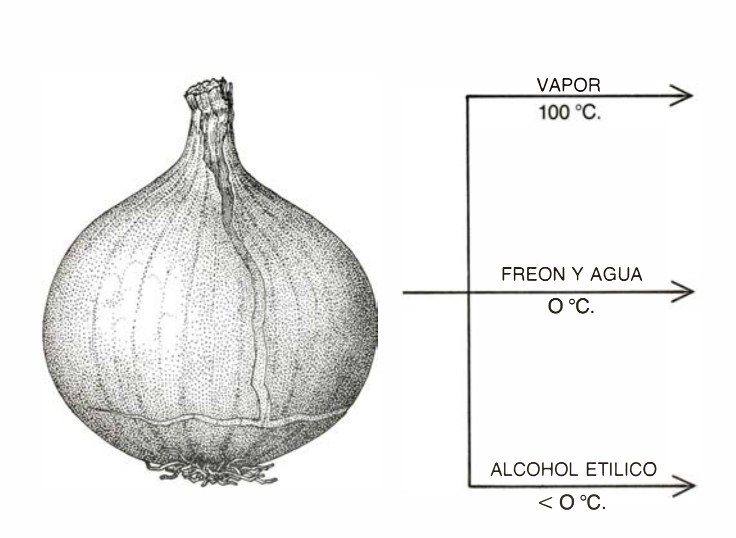
Se encontró que la sangre de este último grupo era la que tenía el tiempo más corto de coagulación. Además, este grupo tenía el nivel más alto de fibrinógeno en plasma (una de las etapas del proceso de coagulación consiste en la conversión del fibrinógeno en fibrina). Los resultados de estudios realizados durante la década de los 70 indicaban que ciertos aceites extraídos del ajo y la cebolla inhibían la agregación plaquetaria. Así, la opinión popular sobre el ajo y la cebolla parecía ganar en credibilidad.

¿Cómo producen sus efectos el ajo y la cebolla? La respuesta hay que buscarla en el nivel molecular, entre las sustancias que componen el ajo y las cebollas. Uno de los primeros estudios sobre este punto lo realizó en 1844 el químico alemán Theodor Wertheim. Se centró en el ajo. Wertheim atribuyó el atractivo del ajo "principalmente a la presencia de un cuerpo azufrado líquido, el llamado aceite de ajo. Todo lo que se sabe de este material se limita a unos pocos hechos sobre el producto puro, que se obtiene por destilación al vapor de bulbos de *Allium sativum*. Como la unión del azufre ha sido poco investigada hasta hoy, el estudio de este material promete suministrar útiles resultados para la ciencia".

Wertheim empleó la destilación al vapor. Colocó ajos en agua hirviendo: el vapor desprendido contenía pequeñas cantidades de aceite de ajo. Al destilar este aceite se obtuvieron algunas sustancias volátiles de olor fuerte. Wertheim propuso el nombre alilo (de *Allium*) para el grupo hidrocarburo del aceite y, schwefelallyl (sulfoalilos en español), para las sustancias volátiles. Se sigue todavía empleando el término alilo para referirse a los grupos de es-



1. COMPUESTOS AZUFRADOS que se extraen del ajo: dependen de las condiciones de extracción. La técnica más drástica es la destilación al vapor, o sea, la cocción del ajo seguida de la extracción de los compuestos del vapor condensado con lo que se obtiene el disulfuro de dialilo (*arriba*). Mediante una técnica más suave, que utiliza como disolvente alcohol etílico a temperatura ambiente, se obtiene el óxido del disulfuro de dialilo llamado alicina (*centro*), al que se debe el olor del ajo. Otra técnica aún más suave emplea alcohol etílico puro a temperaturas inferiores a cero y permite obtener aliina, una molécula con isomería óptica o formas químicas especulares en los átomos de azufre y carbono (*asteriscos*). (Aunque son posibles cuatro formas, sólo una se encuentra, sin embargo, en el ajo.) Una enzima transforma la aliina en alicina. Solamente se representa el esqueleto carbonado de cada molécula.



2. COMPUESTOS AZUFRADOS que se extraen de las cebollas: dependen también de las condiciones de extracción. La destilación al vapor produce propionaldehído y disulfuro de dipropilo (*arriba*). El disolvente Freon (mezclado con agua a cero grados Celsius) extrae el factor lacrimógeno (*centro*), sustancia que hace llorar a las personas cuando cortan cebolla. El factor tiene dos formas, llamadas *syn* y *anti*; predomina la forma *syn*. El alcohol etílico puro a temperaturas inferiores a cero extrae el precursor lacrimógeno (*abajo*). Se trata de un isómero estructural de la aliina, o sea, los dos difieren solamente en la estructura. En las cebollas, una enzima transforma el precursor lacrimógeno en el factor lacrimógeno [*véase la ilustración siguiente*].

tructura CH_2 = CH-CH_2- o en fórmula condensada C_3H_5-. Muchos compuestos que contienen un grupo alilo tienen un olor picante.

En 1892 otro investigador alemán, el químico F. W. Semmler, aplicó la destilación al vapor a los dientes de ajo, obteniendo uno o dos gramos de un aceite maloliente por kilogramo de ajo. Este aceite produjo, a su vez, disulfuro de dialilo ($C_6H_{10}S_2$ o más precisamente CH_2 = CH-CH_2S-SCH_2-CH = CH_2), junto con cantidades más pequeñas de trisulfuro y tetrasulfuro de dialilo [*véase la figura 1*]. Al destilar al vapor de 5000 kilogramos de cebollas se sacó un aceite diferente, que contenía propionaldehído (C_2H_5CHO), así como numerosos compuestos azufrados, entre ellos disulfuro de dipropilo ($C_6H_{12}S_2$).

El siguiente descubrimiento clave en la química del ajo y las cebollas fue realizado en 1944 por Chester J. Cavallito y sus colaboradores en la empresa química Sterling-Winthrop en Rensselaer, Nueva York. Descubrieron que utilizando métodos más suaves que la destilación al vapor se obtenían sustancias algo diferentes. Cavallito trató cuatro kilogramos de ajos con alcohol etílico a temperatura ambiente y obtuvo como producto final seis gramos de aceite de fórmula $C_6H_{10}S_2O$, dotado de propiedades antibacterianas y antifúngicas. Frente a *B. typhosus* resultó más potente que la penicilina o la sulfaguanidina, mientras que en otros casos su poder antibiótico fue inferior al de la penicilina.

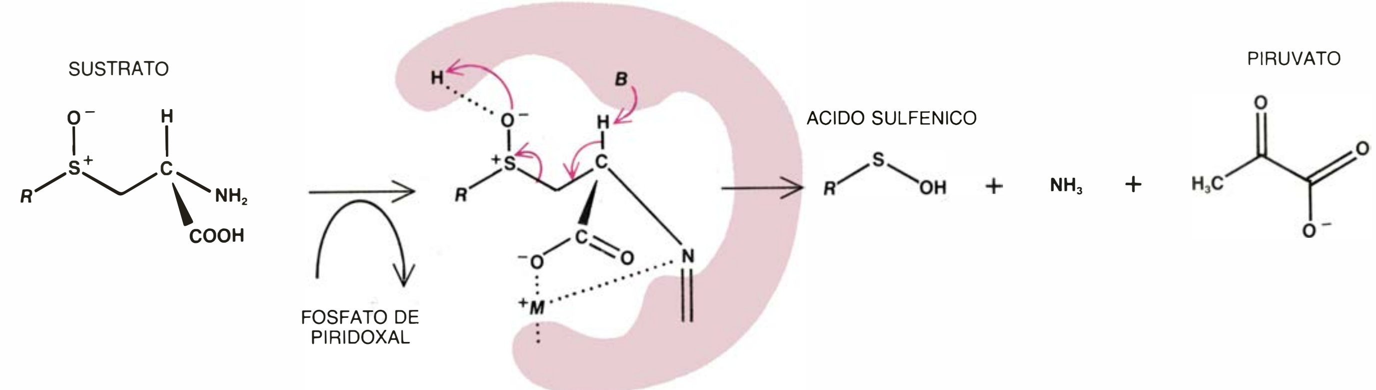
Químicamente, el aceite extraído por Cavallito es el óxido del disulfuro de dialilo, la sustancia principal aislada por Semmler en la destilación al vapor medio siglo antes. Su fórmula química, CH_2= CH-CH_2S(O)SCH_2-CH = CH_2, resulta casi impronunciable: se trata del 2-propentiosulfinato de alilo. La nomenclatura química, aunque engorrosa, caracteriza con precisión una molécula. Cada parte de un nombre químico se refiere a la estructura de una sección del esqueleto carbonado de la molécula o indica la interrupción del esqueleto por átomos, como el azufre. En el 2-propentiosulfinato de alilo, el 2 especifica que un doble enlace carbono-carbono (=) está situado entre el segundo y tercer átomo de carbono contando desde el átomo de azufre. Cuando un átomo o un grupo de átomos se encuentran entre paréntesis, significa que estos átomos o grupos están situados fuera de la cadena principal de la molécula.

En cualquier caso, Cavallito denominó a su descubrimiento alicina. Se trata de un líquido incoloro, químicamente inestable, al que se debe el olor del ajo mucho más que a los sulfuros de dialilo. Está registrada en dos patentes estadounidenses a nombre de Cavallito, aunque por su olor se abandonó su uso como agente antibacteriano, tras un breve período de ensayos.

Si bien la alicina es la sustancia responsable del olor del ajo, un bulbo de esta planta no huele o huele muy poco hasta que no se corta o machaca. En 1948 Arthur Stoll y Ewald Seebeck de la casa Sandoz de Basilea descubrieron la razón. La alicina se origina en el ajo cuando una enzima inicia su formación a partir de una molécula precursora inodora, identificada por Stoll y Seebeck como (+)-S-alil-L-cisteinil sulfóxido, o CH_2 = CH-CH_2-S(O)CH_2-CH(NH_2)-COOH. (El + y la letra L significan una particular disposición espacial del átomo de azufre y del átomo de carbono al que está unido el nitrógeno.) Evidentemente, al cortar o machacar un ajo se posibilita el contacto entre la enzima llamada alinasa y el precursor de la alicina.

Stoll y Seebeck denominaron a este precursor aliina; representa aproximadamente el 0,24 por ciento en peso de un bulbo típico de ajo. Se puede formar por la unión de un grupo alilo y de un átomo de oxígeno al átomo de azufre del aminoácido cisteína. La aliina también puede obtenerse del ajo en condiciones químicas de extracción suave, apareciendo por cristalización en forma de agujas muy finas, incoloras e inodoras.

La aliina es una molécula notable. Constituyó el primer producto natural donde se encontró isomería óptica, debida a la existencia de formas especulares en los átomos de azufre y de carbono. La isomería óptica aparece cuando una molécula tiene dos formas especulares y la naturaleza favorece la prevalencia de una sobre la otra. Una solución de una de estas formas es capaz de hacer girar un rayo de luz polarizada. En la aliina, son posibles configuraciones especulares tanto en los átomos de azufre, como de carbono. Por acción de la alinasa, la aliina se descompone dando lugar al ácido 2-propensulfénico [*véase la figura 3*]. La enzima actúa preferentemente sobre el isómero de la aliina designado con (+), la forma que, en solución, hace girar el rayo de luz polarizada en el sentido de las agujas del reloj. El ácido 2-propensulfénico, a su vez, se dimeriza con una segunda molécula de ácido 2-propensulfénico, dando lugar a la alicina.



3. ALINASA, enzima que cataliza la transformación de varios compuestos de azufre en el ajo y las cebollas. En el ajo actúa sobre la aliina y en las cebollas sobre el precursor lacrimógeno. Aquí se muestra esquemáticamente la catálisis para un sustrato general. (Por ejemplo, si *R* es un grupo alilo, C_3H_5-, el sustrato es la aliina.) Un cofactor, el fosfato de piridoxal, actúa sobre el sustrato de suerte que éste forme un complejo con la enzima. La unión se debe a una interacción electrostática entre el sustrato y un ion metálico (M^+). Un grupo básico, *B*, de la enzima elimina entonces un protón o hidrogenión del sustrato, lo que dispara la rotura del sustrato y la liberación de un ácido sulfénico, RSOH, amonio y piruvato. Una reacción es una transformación de los enlaces químicos en las moléculas, que se simboliza mediante el desplazamiento de pares de electrones. Las flechas (*color*) indican los desplazamientos.

METANOTIOSULFINATO DE METILO

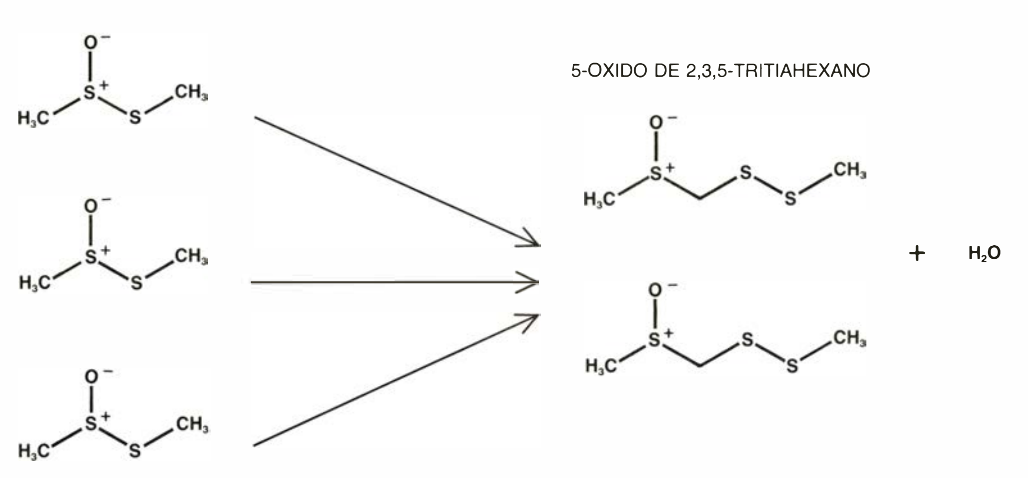
TIOFORMALDEHIDO

ACIDO METANOSULFENICO

$H_2C = S$

$H_3C{-}S{-}OH$

H_2O



4. VIAS DE DESCOMPOSICION del metanotiosulfinato de metilo, un homólogo, o versión simplificada, de la alicina; sirvió para elucidar las vías de descomposición de la propia alicina. En una ruta (*arriba*), el metanotiosulfinato de metilo se descompone en ácido metanosulfénico y tioformaldehído. A continuación, dos moléculas de ácido metanosulfénico se combinan para regenerar una molécula de metanotiosulfinato de metilo. En otra ruta (*abajo*), tres moléculas de metanotiosulfinato de metilo se autocondensan dando lugar al 5-óxido de 2,3,5,-tritiahexano, cuya fórmula es $CH_3S(O)CH_2$-$SSCH_3$.

Al mismo tiempo que se investigaba en la química del ajo, iba apareciendo también la química de la cebolla. En 1961 el bioquímico finlandés Artturi Virtanen (premio Nobel de química en 1945 por sus trabajos sobre nutrición animal) demostraba que las cebollas contenían *trans*-(+)-S-(1-propenil)-L-cisteinil sulfóxido [*véase la figura 2*], un isómero de posición de la aliina. Es decir, se trataba de una sustancia con un contenido químico idéntico al de la aliina, que sólo difería en su estructura. (Específicamente, difiere en la posición de un doble enlace que, como indica el 1 de su nomenclatura química, se encuentra unido directamente al átomo de azufre.) El *trans*-(+)-S-(1-propenil)-L-cisteinil sulfóxido es el precursor lacrimógeno (PL) de la cebolla: la alinasa de la cebolla convierte el PL en el factor lacrimógeno (FL), sustancia que hace llorar cuando se pela una cebolla.

La fórmula química del FL es C_3H_6SO, que puede atribuirse a más de 50 estructuras químicas diferentes. Virtanen postuló que la verdadera estructura era CH_3-CH=CHS(O)H y no la posible estructura alternativa CH_3-CH =CHS-O-H, en la que el átomo de oxígeno se hallaba situado en la cadena principal del esqueleto carbonado de la molécula. (Estos compuestos se llaman los dos ácido *trans*-1-propensulfénico.) Por este tiempo, sin embargo, W. F. Wilkins, alumno de doctorado en la Universidad de Cornell, propuso la estructura C_2H_5CH =SO, que correspondía al nombre S-óxido de propanotial. Diez años más tarde, en 1971, M. H. Brodnitz y J. V. Pascale, de la International Flavors and Fragances Company (Compañía Internacional de Sabores y Fragancias) en Union Beach, Nueva Jersey, confirmaron la hipótesis de Wilkins.

En el ajo, por tanto, una alinasa convierte enzimáticamente la aliina en alicina, componente odorífero del ajo. En las cebollas una alinasa convierte enzimáticamente el precursor lacrimógeno en el factor lacrimógeno. Estas enzimas hacen además otras cosas. En el ajo y en las cebollas actúan sobre varias moléculas: en la jerga química, actúan sobre otros sustratos. Todos ellos son sustancias azufradas, sintetizadas en ajos y cebollas mediante secuencias químicas que comienzan con el aminoácido azufrado cisteína. A partir de ellos, las alinasas producen varios tipos de ácidos sulfénicos, RSOH, donde R es un radical alilo (CH_2 =$CHCH_2$-), 1-propenilo (CH_3-CH =CH-), metilo (CH_3-) o propilo (C_3H_7-). Los subproductos de la reacción son piruvato (CH_3-C(O)COO^-) y amoniaco (NH_3).

Trabajos recientes indican que estas reacciones requieren una sustancia adicional, o cofactor, denominada fosfato de piridoxal. Al parecer, el cofactor y el sustrato interaccionan de modo que

ALICINA

TRANS-AJOENO

CIS-AJOENO

ALICINA

ACIDO 2-PROPENOSULFENICO

TIOACROLEINA

MAYORITARIO

MINORITARIO

2-VINIL-[4H]-1,3-DITIINA

3-VINIL-[4H]-1,2-DITIINA

5. DESCOMPOSICION DE LA ALICINA a través de varias rutas. En una de ellas (*arriba*) se combinan tres moléculas de alicina para dar lugar a dos moléculas de ajoeno. Los estudios con el metanotiosulfinato de metilo han sugerido el mecanismo del proceso. Se ha demostrado que el ajoeno es un antitrombogénico tan potente como la aspirina; evita la agregación de las plaquetas de la sangre impidiendo su coagulación. El ajoeno tiene dos formas: *trans* y *cis*. Esta última es algo más potente. En otra ruta (*abajo*), la alicina se autodescompone dando ácido 2-propensulfénico y tioacroleína, altamente reactivos. La autocondensación de dos moléculas de ácido 2-propensulfénico regenera una molécula de alicina y, la autocondensación de dos moléculas de tioacroleína, forma dos tipos de compuestos cíclicos por la reacción de Diels-Alder; se trata, en ambos casos, de compuestos son antitrombogénicos suaves.

el sustrato se convierte en una forma activada. Un grupo básico de la enzima (grupo aceptor de protones) inicia entonces la liberación de ácido sulfénico. Estos ácidos sulfénicos, muy inestables, sufren ulteriores transformaciones de forma espontánea.

Mis investigaciones sobre la química del ajo y las cebollas comenzaron en 1971, cuando me proponía una más profunda exploración de las propiedades de la alicina. Con un grupo de colegas de la Universidad de Missouri en Saint Louis iniciamos un estudio relativo a las transformaciones químicas del metanotiosulfinato de metilo, $CH_3S(O)SCH_3$. Este compuesto es el homólogo más sencillo de la alicina: por una parte, tiene un grupo químico (S(O)H) básico en la química de la alicina; por otra parte, su esqueleto carbonado es más simple que el de la alicina. Trabajando con John O'Connor descubrimos dos procesos químicos infrecuentes [*véase la figura 4*]. En uno de ellos, el metanotiosulfinato de metilo se descompone en ácido metanosulfénico, CH_3-SOH, y tioformaldehído, CH_2=S. A continuación, dos moléculas de ácido metanosulfénico, sustancia altamente reactiva, se combinan con pérdida de una molécula de agua, para volver a dar una molécula de metanotiosulfinato de metilo. En el segundo proceso, el metanotiosulfinato de metilo se autocondensa y forma como resultado el 5-óxido de 2,3,5-tritiahexano, $CH_3S(O)CH_2$-$SSCH_3$.

Doce años más tarde nuestros trabajos sirvieron para elucidar la estructura y modo de formación del factor antitrombogénico del ajo. Mahendra K. Jain y Roger W. Crecely, de la Universidad de Delaware, en colaboración con Rafael Apitz-Castro y María R. Cruz, del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas en Caracas, obtuvieron varios extractos de ajo particularmente activos como antiagregantes plaquetarios. El extracto con mayor actividad tenía la fórmula química $C_9H_{14}S_3O$. En estrecha colaboración con los investigadores de Delaware y Venezuela, Saleem Ahmad y el autor, trabajando en la Universidad estatal de Nueva York en Albany, establecieron la estructura del compuesto CH_2 =CH-CH_2-S(O)CH_2CH = CHSSCH_2CH = CH_2, o 9-óxido de 4,5,9-tritiadodeca-1,6,11-trieno; lo denominamos ajoeno, de la palabra española *ajo*.

Mis resultados anteriores sobre la autocondensación del metanotiosulfinato de metilo sugerían la posibilidad de que el ajoeno se formara por autocondensación de la alicina. Confirmamos esta hipótesis simplemente calentando alicina con una mezcla de agua y disolvente orgánico: acetona [*véase la figura 5*]. Diversos experimentos han indicado, desde entonces, que el ajoeno es un agente antitrombogénico tan potente, por lo menos, como la aspirina. Estudios de los grupos de Delaware y Venezuela, en colaboración con James Catalfamo, del Departamento de Sanidad del estado de Nueva York en Albany,

indicaron que el ajoeno actúa inhibiendo los receptores del fibrinógeno de las plaquetas. Más específicamente, puede existir una interacción de los grupos hidrocarburos, azufre-oxígeno y azufre-azufre del ajoeno con grupos químicamente complementarios en la superficie de las plaquetas, que, en circunstancias normales, unen moléculas de fibrinógeno. Ulteriores experimentos, en vías de realización, deberían establecer si el ajoeno sirve como droga antitrombogénica.

Un segundo aspecto de la química del metanotiosulfinato de metilo, compuesto homólogo de la alicina, también resultó muy instructivo. Anteriormente, habíamos observado que la descomposición del metanotiosulfinato de metilo producía tioformaldehído ($CH_2{=}S$). Lo mismo parecía ocurrirle a la alicina. En realidad, la alicina al descomponerse da tioacroleína, $CH_2 = CHCH = S$, compuesto muy reactivo de color azul zafiro. Hans Bock, de la Universidad de Francfort, ha demostrado que la tioacroleína se dimeriza produciendo dos compuestos cíclicos. Nosotros hemos encontrado estos compuestos en el ajo, en la proporción predicha por Bock. La dimerización tiene lugar mediante la reacción llamada de Diels-Alder, en la cual una unidad de cuatro átomos de una molécula y otra unidad de dos átomos de otra molécula se combinan para formar un anillo de seis átomos. Las reacciones de Diels-Alder son de las más importantes en química orgánica.

En el caso de las cebollas persistía un problema: el factor lacrimógeno había sido identificado como el $C_2H_5CH{=}SO$, o S-óxido de tiopropanaldehído, pero esta molécula tenía dos isómeros. Con objeto de aclarar cuál de los dos estaba presente en las cebollas, Larry Revelle, Robert E. Penn y Ali Bazi emprendieron una serie de estudios en mi laboratorio. Para extraer el factor lacrimógeno picaron cebollas congeladas, les añadieron un disolvente (Freon), obtuvieron un residuo eliminando el disolvente a −78 grados Celsius y destilaron este residuo a −20 grados al vacío. Seguidamente, la estructura del factor se estableció mediante dos técnicas diferentes de espectroscopía molecular (espectroscopía de microondas y espectroscopía de resonancia magnética nuclear). En una gran proporción se trata del S-óxido del *syn*-tiopropanaldehído; el isómero *anti* se encuentra sólo en trazas. En la forma *syn* el grupo etilo (C_2H_5-) en un extremo de la cadena carbonada de la

6. VIAS DE FORMACION del factor lacrimógeno. Son complejas. En el precursor inmediato del factor, el ácido 1-propensulfénico, el grupo SOH se encuentra unido a un doble enlace. Su proximidad favorece una transferencia interna de hidrógeno (*flechas de color*) y, por tanto, la formación del factor, que es un compuesto altamente reactivo. El factor puede hidrolizarse (*arriba*) y rendir propionaldehído, ácido sulfúrico y ácido sulfhídrico. Se puede combinar consigo mismo (*centro*), produciendo un curioso anillo de cuatro átomos. Y puede cerrarse, formando una estructura bicíclica, según se ve abajo.

molécula está cerca del átomo de oxígeno que se encuentra en el otro extremo de la misma.

Dos experimentos de mi laboratorio resolvieron otro problema. En el ajo, las alinasas producían ácidos sulfénicos; en las cebollas, S-óxidos de tiopropanaldehido, sustancias diferentes de los ácidos sulfénicos. Específicamente, los S-óxidos de tiopropanaldehído pertenecen a la clase de compuestos llamados sulfinas. Procesos químicos muy diferentes deberían ocurrir si las sulfinas se formaran directamente; conclusión incómoda, ya que una enzima ordinariamente suele tener un modo de acción y no varios.

En un primer experimento Penn estableció por espectroscopía que la estructura del ácido metanosulfénico (el ácido sulfénico más sencillo) era CH_3S-O-H, y no $CH_3S(O)H$. A continuación, en un segundo experimento, Penn y yo encontramos que cuando el ácido *trans* 1-propensulfénico (el factor lacrimógeno, según Virtanen) se preparaba químicamente, se reordenaba rápidamente dando el S-óxido de *syn*-tiopropanaldehído. Si suponemos (sobre la base del primer experimento) que el ácido *trans*-1-propensulfénico tiene la estructura CH_3CH = CH-S-O-H en vez de CH_3CH = CHS(O)H, se puede inferir cómo se ha producido la reordenación: mediante una transferencia interna de hidrógeno [*véase la figura 6*]. Concluimos que el estadio inicial en la formación del factor lacrimógeno en las cebollas produce un ácido sulfénico (ácido 1-propensulfénico) que, a continuación, se transforma rápidamente en el verdadero factor lacrimógeno, el S-óxido de *syn*-tiopropanaldehído.

El factor lacrimógeno, por su parte, es muy reactivo. En el laboratorio puede hidrolizarse, dando, entre otras cosas, ácido sulfúrico. Se puede dimerizar, rindiendo un dímero del FL cuya curiosa estructura muestra un anillo de cuatro átomos. Según encontramos Alan Wall y yo, puede experimentar una reacción de Diels-Alder con ciclo pentadieno, molécula cíclica de gran reactividad que contiene una unidad de cuatro átomos, llamada dieno. La reacción encierra la estructura *syn* del factor lacrimógeno en un rígido armazón molecular de dos anillos unidos.

Las propiedades químicas del factor lacrimógeno explican la eficacia de los métodos utilizados en la cocina para disminuir las molestias del trabajo con las cebollas. Al enfriar una cebolla, disminuye la volatilidad del factor lacrimógeno. Al pelar una cebolla bajo un chorro de agua, se arrastra el factor lacrimógeno, ya que es hidrosoluble.

¿Por qué la naturaleza ha dotado a los ajos y cebollas de la maquinaria química para producir alicina y el factor lacrimógeno? Por constituir la alicina un compuesto antifúngico y antibiótico, una explicación podría ser la de proteger al bulbo del ajo contra la podredumbre por hongos. Y como el factor lacrimógeno irrita y repugna a ciertos animales, podría tener también un valor de supervivencia.

Queda la cuestión de las propiedades antitrombogénicas de ciertas moléculas del ajo. Ni mis colegas ni yo hemos detectado nunca ajoeno o compuestos cíclicos antitrombogénicos en polvo de ajo deshidratado; ni tampoco hemos encontrado estas sustancias en pastillas, aceites, extractos u otras preparaciones pertinentes de ajo. La explicación posible sería que la manufactura de la mayor parte de estos productos comienza con una destilación al vapor del ajo. Por el momento, los efectos beneficiosos atribuibles al ajo se obtienen en el mayor grado con ajo fresco. Por descontado que la automedicación con pócimas preparadas con ajo y cebolla no debe sustituir a un diagnóstico y tratamiento médicos adecuados. Para ello el sentido común nos da la razón más poderosa; el olfato nos suministra otra complementaria. Los ajos y cebollas nos recuerdan prolongadamente su ingestión: los compuestos azufrados penetran en el torrente sanguíneo y salen con el aliento y el sudor. Quizás el mejor resumen de las virtudes y los defectos del ajo es el que hace Sir John Harrington en "The Englishman's Doctor", escrito en 1609:

"Como el ajo puede
de la muerte salvar
su hediondo aliento
convendrá soportar,
y no, como algún sabio,
su virtud desdeñar."

Juegos de ordenador

Virus, gusanos y otras plagas de la Guerra Nuclear atentan contra la memoria de los ordenadores

A. K. Dewdney

Cuando en julio del año pasado apareció el artículo dedicado a la "guerra nuclear", no se me ocurrió que pudiera estar tocando un tema tan serio. Las descripciones de programas escritos en lenguaje de máquina que entonces di, capaces de desplazarse de uno a otro lugar de la memoria, al acecho, dispuestos a aniquilarse uno al otro, pulsaron una cuerda resonante. Según muchos lectores, cuyas historias y anécdotas referiré, existen multitud de gusanos, virus y otros organismos "programáticos", que moran en todo ambiente informático concebible. Tan horripilantes son algunas de las posibilidades, que dudo si transcribirlas.

Una novela de espionaje francesa, *Softwar: La Guerre Douce*, nos propone una fantasía geopolítica de este estilo. Los autores, Thierry Breton y Denis Beneich, urden una increíble trama, en torno a la adquisición por la Unión Soviética de un superordenador estadounidense. En lugar de bloquear tal venta, las autoridades estadounidenses, tras una estudiada renuncia, acaban por acceder a la transacción. El ordenador está secretamente programado con una "mina de *software*". Ostensiblemente adquirido con la finalidad de facilitar la predicción meteorológica sobre el inmenso territorio de la Unión Soviética, la máquina, o mejor, su programación, oculta un detonador. Tan pronto el Servicio Meteorológico de los Estados Unidos dé cuenta de que la temperatura en Santo Tomás, en las Islas Vírgenes, alcanza un determinado valor, el programa emboscado emprende la destrucción de todo programa que pueda hallar en la red informática soviética. En la medida en que tales ficciones puedan reflejar posibilidades reales, siente uno tentación de decir, "Si ha de haber guerra, por amor de Dios, que sea así". Por otra parte, la hipótesis de un accidente a causa de la íntima conexión entre la programación de índole militar y los sistemas de control de armas me hace vacilar.

Antes de entrar en la descripción de las experiencias de diversos lectores, seguramente valga la pena resumir en qué consistía la "guerra nuclear", en beneficio de quienes no hayan leído el artículo de julio pasado.

Dos jugadores preparan sendos programas, redactados en un lenguaje de bajo nivel llamado REDCODE. Estos programas son emplazados en un gran coso circular llamado Núcleo. En realidad, este Núcleo no es más que una matriz de millares de ubicaciones de la memoria, cuya última dirección es adyacente a la primera. Cada instrucción de los programas combatientes ocupa una ubicación en el Núcleo. Un programa ejecutor, llamado MARS (*M*emory *A*rray *R*edcode *S*imulator), se encarga de hacer funcionar los programas de combate, ejecutando alternativamente, por turno, una instrucción de cada uno, de modo similar al de un sistema de compartición de tiempos. Los dos programas se buscan y atacan, procurando al propio tiempo evitar daños propios o reparar los sufridos. Podemos llevar a cabo un ataque de tipo sencillo mediante instrucciones MOV. Por ejemplo,

```
MOV #0 1000
```

tiene por efecto colocar un 0 en la posición de memoria situada 1000 lugares más allá de esta instrucción. El contenido que anteriormente estuviera allí ubicado queda eliminado. Si este 0 fuese a caer en una de las instrucciones del programa enemigo, tal instrucción sería eliminada y el programa se inutilizaría. El enemigo perdería la partida.

Dado que ningún ordenador, sea personal o un gran sistema, viene equipado con un REDCODE ni con una matriz de memoria preparada para servir de campo de batalla, es preciso simular tales características.

Inspirado por un artículo de L. S. Penrose acerca de mecanismos autorreproductivos, publicado en *Scientific American* en junio de 1959, Frederick G. Stahl, de Chesterfield, Missouri, creó un universo rectilíneo en miniatura, en el cual moraban humildes seres que vivían, se movían y, tras cierto tiempo, agotaban su existencia. Escribe Stahl:

"Lo mismo que en la Guerra Nuclear, reservé un segmento de la memoria principal, en el cual, mediante un programa en código de máquina modificado, se simulaba un ser. La máquina era una IBM tipo 650, con memoria de tambor. La criatura estaba programada para ir reptando a lo largo de su universo, alimentarse (de palabras no nulas) y crear un duplicado de sí misma en cuanto hubiese acumulado comida suficiente. Al igual que en la guerra nuclear, tenía yo un programa ejecutor, encargado de saber quién permanecía con vida, y de asignar tiempo de ejecución a los seres vivos. Lo llamé 'La mano izquierda de Dios'." Prosigue Stahl analizando la capacidad de su programa para reproducirse. Describe también un interesante mecanismo de mutación: al copiarlos, los programas podrían experimentar en su código un pequeño número de alteraciones aleatorias. Sin embargo, explica Stahl, "abandoné esta línea de trabajo tras una pasada de producción, en la cual, un mutante estéril mató y devoró a la única criatura fértil del universo. Saltaba a la vista que harían falta memorias extraordinariamente grandes y largos períodos de funcionamiento del ordenador para lograr algún resultado interesante".

Una historia parecida vale para un juego llamado Animal, en el que un programa prueba a acertar en qué animal está pensando un humano, mediante una variante del juego de las "veinte preguntas". David D. Clark, del laboratorio de informática del Insti-

tuto de Tecnología de Massachusetts, explica que los empleados de una cierta compañía eran devotos jugadores de Animal. Aunque no se parece ni a un programa de combate ni a las sencillas criaturas de Stahl, Animal adquirió la capacidad de reproducirse a sí mismo en los pasillos y recovecos de la memoria núcleo, gracias a los esfuerzos de un programador por ampliar una característica fundamental del programa: cuando el programa fracasa al probar de adivinar cuál es el animal que el humano tiene en mente, le pide a éste que sugiera una pregunta que le permita mejorar su tino en el futuro. Esta característica, sigue diciendo Clark, llevó al programador a inventar un cierto truco que asegurase que todos dispusieran de la misma versión de Animal.

"En uno de los más primitivos sistemas de cómputo, desprovisto de estructuras de directorio compartido, pero también de cualesquiera instrumentos de protección, un programador inventó un método muy novedoso para poner el juego a disposición de varios jugadores. Existía una versión del juego en el directorio de uno de los usuarios. Siempre que éste lo jugaba, el programa sacaba una copia de sí mismo, que se introducía en otro directorio. Si tal directorio contenía ya una copia del juego, la antigua versión se actualizaba, con lo que para el correspondiente jugador la conducta del juego cambiaba inesperadamente. Y si ese directorio no contenía ninguna versión de Animal, el juego quedaba a disposición de un usuario más.

Clark recuerda que Animal llegó a ser un juego tan popular, que al cabo del tiempo todos los directorios del sistema informático de la empresa contenían ya una copia. "Además, cuando los empleados se mudaban a otras divisiones de la compañía, se llevaban también un Animal, que de este modo fue propagándose de unas máquinas a otras. La situación nunca hubiese llegado a revestir gravedad, de no ser porque tantas versiones se hicieron de este juego, por lo demás inofensivo, que la memoria de discos empezó a saturarse. La situación no quedó bajo control hasta que alguien ideó una versión más "virulenta" del juego. Con la nueva versión, en cada partida, el nuevo "Animal" no se copiaba una, sino dos veces, en otros directorios. Con suficiente tiempo, se pensó, este programa acabaría por actualizarse en todas las versiones antiguas de Animal. Al cabo de un año, una cierta fecha activaba a cada una de las copias del nuevo programa Animal. "En lugar de sacar otras dos copias de sí mismo al ser reclamado, jugaba ahora una última partida, se despedía del usuario con un 'Adiós', y se borraba a sí mismo. De este modo pudo depurarse el sistema."

INSTRUCCION	ABREVIATURA	CODIGO	ARGUMENTOS		EXPLICACION
Trasladar (Move)	MOV	1	A	B	Traslada el contenido de la dirección *A* a la dirección *B*.
Sumar (Add)	ADD	2	A	B	Suma el contenido de la dirección *A* a la dirección *B*.
Restar (Substract)	SUB	3	A	B	Resta el contenido de la dirección *A* de la dirección *B*.
Saltar (Jump)	JMP	4	A		Transfiere el control a la dirección *A*.
Saltar si es cero (Jump if zero)	JMZ	5	A	B	Transfiere el control a la dirección *A* si el contenido de la dirección *B* es cero.
Saltar si es mayor (Jump if greater)	JMG	6	A	B	Transfiere el control a la dirección *A* si el contenido de la dirección *B* es mayor que cero.
Decrementar; saltar si es cero (Decrement; jump if zero)	DJZ	7	A	B	Resta 1 del contenido de la dirección *B* y transfiere el control a la dirección *A* si el contenido de la dirección *B* es entonces igual a cero.
Comparar	CMP	8	A	B	Compara los contenidos de las direcciones *A* y *B*; si son distintos, pasa por alto la instrucción siguiente.
Escindir (Split)	SPL	9	A		Escindir la ejecución en la instrucción siguiente y la instrucción situada en *A*.
Declaración de dato (Data statement)	DAT	0		B	Enunciado no ejecutable. *B* es el valor del dato.

1. Relación de instrucciones para programas de Guerra Nuclear

Ruth Lewart, de Homdel, Nueva Jersey, creó en cierta ocasión un monstruo (o algo por el estilo) sin escribir siquiera un programa. Se encontraba trabajando para su compañía en un sistema de tiempo compartido, preparando una versión de exhibición de un programa didáctico, cuando se le ocurrió hacer una copia de reserva en otro sistema de tiempo compartido. Cuando el primer sistema, sobrecargado, comenzó a mostrar excesiva tardanza, Lewart conmutó al sistema de reserva, "que respondió muy bien... durante tres minutos, al cabo de los cuales dejó de dar respuesta, y nada, sino caos, en la pantalla de mi terminal gráfica. Ninguno de los usuarios del ordenador tenía posibilidad de acceder al sistema, ni de desconectarse de él. La conclusión era inexorable: ¡mi programa había de tener algún fallo! No obstante mi pánico, me dí cuenta de que había yo especificado que el carácter de separación de campos fuese, en mi terminal, el signo &. Pero ocurría que el signo & era también el carácter utilizado por el ordenador central para reproducir a gran escala un proceso de segundo plano. La primera vez que el ordenador efectuó la lectura de mi pantalla, tuvo que haber interceptado la serie de & destinados a mi terminal, multiplicando un gran número de procesos, que a su vez engendraron nuevos procesos, y así, *ad infinitum*". Una frenética conferencia telefónica con uno de los administradores del sistema le informó del origen de la enfermedad, y el ordenador tuvo que ser aislado, y vuelto a poner en servicio. Inútil decir que Lewart cambió el signo & por otro menos peligroso; su programa ha venido "tarareando felizmente" desde entonces.

Aun cuando los programas de la Guerra Nuclear no proliferan de esta manera, su probabilidad de supervivencia puede acrecentarse mucho por medio de copias adicionales. Varios lectores propusieron que se hicieran tres copias de los programas, a fin de que la copia que en ese momento se esté ejecutando pudiera averiguar, con ayuda de las otras dos, si contiene alguna instrucción errónea. El programa ejecutor podría incluso sustituir las instrucciones deterioradas por otras viables. Una idea similar es la subyacente a Scavenger ("Barrendero"), un programa ideado con la finalidad de proteger de errores los archivos de almacenamiento masivo cuando se hacen copias de salvaguardia en cinta magnética. Arthur Hudson, con residencia en Newton, Massachusetts, escribe: "Quien haya tenido que utilizar gran-

des cantidades de cinta magnética se habrá sentido acosado y hostigado por una fuerza extrahumana llamada 'Ley de la probabilidad conjunta'. Hudson procede a citar diversos errores relacionados con la manipulación de cintas, y hace ver que aunque cada tipo de error tenga una probabilidad pequeña de ocurrir, la probabilidad de que se produzca al menos uno de ellos produce incomodidad, por lo grande. Y continúa diciendo:

"Mas no tema, el Barrendero está a su lado. Al poner a su cuidado un archivo de almacenamiento masivo, copiará el archivo en tres cintas magnéticas distintas, sin para nada molestarle con los detalles de mantenimiento. Incluso si el ordenador se colapsa desde el punto de vista lógico (como nos ocurría varias veces al día), por lo común no quedaba destruido el dietario de funcionamiento; cuando el ordenador se recobraba, cualesquiera gusanos que el Barrendero pudiera tener en su agenda funcionaban a su debido tiempo. Cada cinta se grababa por medio de una pasada individual, planificada por un gestor maestro."

Los poseedores de ordenadores Apple deberían tomar precauciones frente a un maligno programita llamado Apple Worm (literalmente, "gusano de la manzana"), creado por Jim Hauser y William R. Buckley, de la Universidad Politécnica estatal de California en San Luis Obispo. Escrito para el Apple II en lenguaje ensamblador del procesador 6502, esta especie de gusano saca copias de sí mismo en su divertido viajecito por el interior de su Apple hospedador y anfitrión. Se empieza, primero, por cargar un programa especial redactado en BASIC [*véase la figura 2*], que sirve, a su vez, para instalar al gusano en la parte baja de la memoria (la porción de más bajas direcciones). El programa en BASIC, por otra parte, ocupa una porción en lo alto.

"Dado que el Gusano queda instalado en una de las zonas reservadas para memoria de gráficos, podemos observar cómo el Gusano se lanza de cabeza (de cola, más bien...) hacia la región alta de la memoria... tras la salida del Gusano de las ventanas de gráficos... puede esperar hasta que borre la totalidad de la parte alta de la memoria (incluido el programa en BASIC) y se estrelle contra las ROM (memorias grabadas de modo permanente, cuyo contenido no puede modificarse) del sistema."

Hauser y Buckley se proponen publicar una colección de gusanos en un futuro no demasiado distante. Han diseñado ya un Sistema Operativo para Gusanos, e incluso han preparado un vídeo-juego, en el que uno de los personajes principales es el Gusano.

Otra plaga informatizada ha sido propuesta por Roberto Cerruti y Marco Morocutti, de Brescia. Inspirados por la traducción del artículo sobre la "guerra nuclear" aparecido en *Le Scienze* (edición hermana de *Investigación y Ciencia* que se edita en italiano), ambos buscaron un medio de infectar el ordenador Apple II, pero no con un gusano, sino con un virus. Explica Cerruti:

"Marco pensó en escribir un programa capaz de pasar de un ordenador a otro, a la manera de un virus, y de este modo, "infectar" otros Apples. No fuimos capaces de concebirlo hasta que caí en la cuenta de que el programa tendría que "infectar" los discos, y valerse de los ordenadores solamente como medio de transmisión de un disco a otro. Así fue como nuestro virus comenzó a adquirir forma.

"Como se sabe, cada diskette de Apple contiene una copia del sistema operativo (*D*isk *O*perating *S*ystem, o brevemente, DOS) que se carga en el ordenador al conectarlo. El virus era una alteración de este DOS, el cual, en cada operación de escritura, verificaba si se encontraba ya presente en el disco, y, si no, procedía a modificar en consecuencia el DOS allí residente. De este modo, el virus sacaría una copia de sí mismo en cada diskette que fuese insertado en el dispositivo lector. Se nos ocurrió que, instalando un tal DOS en algunos discos utilizados en el principal comercio de informática de nuestra ciudad, Brescia, se provocaría una epidemia en toda ella.

Pero, ¿sería una verdadera epidemia la inocua infección de tan inofensivos virus? ¡No, nuestro virus tenía que ser maligno! Así pues, decidimos que al cabo de 16 ciclos autorreproductivos, contados sobre el propio disco, el programa decidiera reinicializar el disco inmediatamente después del primer arranque. Ahora saltaba a la vista la horrible perversidad de nuestra idea, y decidimos no llevarla a la práctica, ni comentarla con nadie."

De lo cual felicitamos a Cerruti y Morocutti. En los ordenadores personales es el sistema operativo de disco el árbitro supremo de la suerte que sufrirán los programas, los datos y demás. En el esquema recién descrito, el sistema operativo infectado borra el disco llegado cierto momento, y por consiguiente nunca podrá volver a cargarse, excepto desde un nuevo disco. El DOS enfermo podría hacer incluso que periódicamente apareciera en la pantalla un mensaje irritante:

¿FALLA SU DISCO?
Ya es hora de que se
provea usted del
DOCTOR DOS
Disponible en disco en
su establecimiento de
informática más cercano

La infección vírica recién descrita ha ocurrido ya en realidad, si bien, a pequeña escala. Un estudiante de secundaria de Pittsburgh, Richard Skrenta Jr., ha escrito un programa de este tipo. En lugar de provocar el borrado de disco o de mostrar mensajes, esta forma de infección provocaba la aparición de sutiles errores a través de todo

```
1   IF PEEK (104) = 134 GOTO 10
2   POKE 104, 134: POKE 134 * 256,0
3   PRINT CHR$(4) "RUN APPLE WORM"
10  HOME : POKE -16302,0: POKE -16304,0: POKE 1023,160
20  FOR I = 0 TO 94: READ D: POKE 1024 + I, D: NEXT I
30  POKE -16368,0
40  IF PEEK (-16384)<128 GOTO 40
50  CALL 1024
100 DATA 160,225,200,185,255,3,153,127,4,192,95,208,245,
    160,18,190,76,4,24,189,128,4,105,128,157,128,4,189,129,
    4,105,0,157,129,4,192,13,208,18,238,23,4,173,23,4
200 DATA 141,151,4,206,31,4,173,31,4,141,159,4,136,208,211,
    173,167,4,72,173,176,4,141,167,4,104,141,176,4,76,128,
    4,7,20,25,28,33,46,55,61,65,68,72,75,4,16,40,43,49,52
```

2. Un gusano que reside en Apples

el sistema operativo. "Todo esto parece ahora muy juvenil", escribe Skrenta, pero, "¡ay, pobre de mí! Nunca jamás he podido liberarme de esta plaga electrónica. Ha infestado todos mis discos, y los discos de todos mis amigos. Se las ha arreglado incluso para colarse en los discos de tratamiento de gráficos de mi profesor de matemáticas." Aunque Skrenta ideó un programa para destruir los virus, su eficacia nunca alcanzó a la del propio virus.

Hay, implícita en esta cuestión, un buen problema, y yo estaría dando muestras de poca sensibilidad y nula imaginación si no lo propusiera: dar, en una página como máximo, una descripción del *DOCTOR* DOS, un programa grabado en disco que de algún modo erradique tales epidemias electrónicas. Muchos de los discos utilizados en ordenadores personales contienen copias del DOS. Este DOS seguirá estando al mando cuando se hagan funcionar otras copias del DOS, y si está infectado, el DOS actualmente al mando puede alterar las otras copias del DOS, e incluso remplazarse por copias de sí mismo. ¿Cómo poner coto a semejante virulencia?

En la versión inicial de la Guerra Nuclear, el problema principal era lograr que el programa de combate A protegiera de los tiros dispersos generados por el programa de combate B. De poder garantizarse, en mayor o menor medida, esta protección, la evolución del juego consistía en pasar al siguiente nivel, en el que los programas se verían forzados a buscarse unos a otros y a desencadenar ataques concentrados.

En el intento de garantizar tal protección, propuse en el artículo de julio la instrucción

PCT *A*

donde *A* es la dirección relativa (sea directa o indirecta) de una instrucción que ha de protegerse. Cualquier intento esporádico de cambiar el contenido de esa instrucción sería impedido por MARS, el sistema supervisor del juego. No obstante, un segundo intento en el mismo sitio sí conseguiría su propósito. Me parecía que utilizando un bucle simple, cualquier programa de combate podría proteger de bombas dispersas a la totalidad de las propias instrucciones durante el tiempo suficiente para hacer una descubierta en busca del otro programa sin ser molestado. La figura 3 muestra en forma esquemática uno de tales programas de autoprotección. El bucle de protección consta de seis instrucciones, cuatro de las cuales son ejecutadas en cada ciclo en torno al bucle. Así pues, un programa de combate formado por n instrucciones (incluido el bucle) precisaría de $4 \times n$ ejecuciones para tener protección completa contra tiros aislados. Esta salutífera coraza de poco vale contra programas como Enano, que lanza dos tiros contra cada posición de la memoria.

DAT		0	/indicador a la dirección que se está protegiendo
ADD	#1	−1	/incrementar la dirección de protección
PCT	@ −2		/proteger la dirección
CMP	#102	−3	/si todas las 102 direcciones están protegidas...
JMP	2		/...abandonar el bucle
JMP	−4		/de lo contrario, reingresar en él.

.
.
CUERPO DEL PROGRAMA DE COMBATE PRINCIPAL
.
.

3. Este bucle protege a los combatientes de bombas perdidas

Cabe otra forma de utilizar esta instrucción, que no fue la prevista en el primer artículo sobre la Guerra Nuclear. Stephen Peters, de Timaru, Nueva Zelanda, y Mark A. Durham, de Winston-Salem, Carolina del Norte, pensaron ambos, independientemente, en utilizar PCT con fines ofensivos. Un programa, llamado Cazaenanos, siembra una barrera de ceros, en la forma habitual, pero protegiendo después cada uno de estos ceros contra la sobreescritura. Ello significa que un programa desprevenido pudiera caer en una de estas trampas durante el proceso de replicación de sí mismo en una nueva región. La instrucción que se pretende situar en la ubicación ocupada por un cero protegido no tendría, como es obvio, efecto en esa ubicación. Posteriormente, cuando la ejecución del programa alcanzase esa dirección de la memoria, el programa moriría, porque 0 no es una instrucción ejecutable. Tal vez valga la pena incluir la instrucción PCT en las futuras versiones de la Guerra Nuclear, pero por el momento la archivaré, en beneficio de la simplicidad, que ha de ser la piedra de toque del diseñador de juegos.

Otras de las ideas sugeridas por los lectores iban desde la propuesta de utilizar para el Núcleo una matriz de memoria bidimensional, de Robert Norton, de Madison, Wisconsin, hasta la regla de limitación del alcance, sugerida por William J. Mitchell, del departamento de matemáticas de la Universidad estatal de Pennsylvania. La idea de Norton se explica en gran medida por sí misma, pero la sugerencia de Mitchell requiere una elaboración algo mayor. Permitamos a cada programa de combate alterar los contenidos de cualesquiera posiciones de la memoria, pero sólo hasta una distancia fija en número de posiciones. Tal regla impide automáticamente al Enano causar daños en el exterior de este entorno. La regla produce además muchos otros efectos, entre ellos, el de poner fuerte énfasis en el movimiento. ¿Cómo, si no, puede lograr un programa de combate que el enemigo quede a su alcance? La regla es de gran mérito, por lo que tengo la confianza en que algunos de los muchos lectores que disponen de un sistema propio de Guerra Nuclear dediquen a su ulterior exploración el esfuerzo que merece.

Norton propone también que en las batallas de Guerra Nuclear, a cada bando se le otorgue en cada turno la ejecución de más de una instrucción. La misma idea se les ocurrió a muchos otros lectores. Y en efecto, he decidido adoptar tal sugerencia. Con ello la Guerra Nuclear adquiere un carácter abierto, del que carecía.

Tal cambio se efectúa añadiendo la instrucción siguiente, que llamaremos una *escisión* ("split"), a la lista oficial de instrucciones de la Guerra Nuclear [*véase la figura 1*].

SPL *A*

Cuando la ejecución del programa pasa por este punto, se escinde en dos partes, a saber, la inmediatamente consecutiva a SPL y la situada *A* posiciones de memoria más allá. Dado que esta posibilidad da inmediatamente oportunidad a cada jugador para tener funcionando simultáneamente varios programas, es necesario definir cómo habrá de proceder MARS para distribuir tales ejecuciones. Caben dos posibilidades.

Para explicarlas más fácilmente, su-

pongamos que uno de los jugadores tenga los programas A_1, A_2 y A_3, mientras que el otro los B_1 y B_2. Una de las alternativas es comenzar por hacer funcionar todos los programas del primer jugador, y seguidamente, todos los del segundo. El orden del ejecución sería entonces A_1, A_2, A_3 y después, B_1 y B_2. Este ciclo se repetiría indefinidamente. La segunda posibilidad consiste en hacer que los programas de los dos jugadores vayan actuando alternativamente, por turnos. En tal caso, la secuencia sería A_1, B_1, A_2, B_2, A_3, B_1, y así sucesivamente. Los dos planes son, en verdad, muy diferentes. El primero carga mucho el acento en la proliferación ilimitada de programas y, de este modo, parece limitar el papel de la inteligencia en el juego. El segundo plan conlleva que cuantos más programas tenga un jugador en la batalla, tanto menos frecuentemente se ejecutará cada uno de ellos. Parece darse aquí un caso de la ley de rendimientos decrecientes, y por ello he optado por el segundo plan. El propósito del juego es, en todo caso, forzar la interrupción de los programas del enemigo.

La nueva instrucción está repleta de imaginativas posibilidades. Como ilustración de la más humilde de las posibles, he aquí un programa de batalla llamado LANZATRASGOS:

```
SPL 2
JMP -1
MOV 0 1
```

Fijémonos en lo que ocurre cuando la ejecución llega por vez primera a lo alto de este programa. La instrucción SPL 2 significa que más tarde le serán otorgados a este programa dos turnos de ejecución: se efectuarán entonces tanto JMP −1 como MOV 0 1. La primera instrucción tiene por efecto que el programa recomience el ciclo, y la segunda pone un Trasgo en movimiento. El Trasgo, claro está, irá descendiendo, dado que el objetivo de la instrucción MOV será siempre la dirección consecutiva, como indica el 1 (positivo). Así pues, en cada ciclo de programa es generado un TRASGO, y un caudal sin fin de TRASGOS corren, marchando al unísono, a través del Núcleo, en pos de la destrucción o la desarticulación de los programas hostiles. A primera vista parece como si no pudiera haber defensa alguna contra un tal ejército de Trasgos, pero en realidad sí hay una. Entra en escena el POZO, un programa todavía más sencillo puesto en acción por una instrucción SPL inserta en un colectivo más amplio de instrucciones, que desea proteger su flanco superior:

```
MOV #0 -1
JMP -1
```

Cada vez que se ejecuta, el POZO sitúa un cero justamente encima de sí, con la esperanza de hacer caer en él a un TRASGO que pueda echársele encima. Ahora es crítica la regla de asignación-ejecución. Si LANZATRASGOS pertenece a A, y el POZO a B, entonces A necesita *n* turnos para ejecutar *n* TRASGOS; solamente un TRASGO puede llegar a la posición de memoria situada justo sobre el POZO. En igualdad de las restantes circunstancias, a B le basta ejecutar una sola vez el POZO para eliminar el TRASGO que se le viene encima.

En una partida de esta Guerra Nuclear generalizada, uno se imagina a cada bando generando y desplegando pequeños ejércitos de programas, configurados individualmente para detectar, atacar, proteger, e incluso reparar a otros. Muchas sutilezas, como la sugerida por John McLean, de Washington D.C., están a la espera de ulterior investigación. McLean inauguró un programa-trampa especial, que sitúa instrucciones JMP en distintas direcciones de la matriz del Núcleo, con la esperanza de infiltrar una instrucción JMP en el seno de un programa enemigo. Cada JMP así situado transferiría la ejecución del programa enemigo al programa-trampa, haciéndolo, por así decirlo, pasarse al otro bando.

Uno de los principales problemas pendientes de resolución emana de la *melée* de programas combatientes. ¿Qué impide que uno de los programas de un bando ataque a sus colegas? Parece imprescindible un sistema de reconocimiento.

Entre los muchos lectores que han construido sistemas de Guerra Nuclear, hay tres merecedores de especial mención: Chan Godfrey, de Wilton, Connecticut, Graeme R. McRae, de Monmouth Junction, Nueva Jersey, y Mike Rosing, de Littleton, Colorado, que han cuidado con especial esmero la documentación y definición de sus proyectos. Sería muy de mi agrado poner a disposición de los lectores la documentación enviada por Rosing, pero hay otra idea mejor, que da cabida a esta posibilidad y al mismo tiempo resuelve otros problemas de comunicación. Si cualquiera de los lectores que ya disponen de un sistema de Guerra Nuclear en funcionamiento se ofreciera voluntario para actuar como director de una red de aficionados a este juego, podrían darse a conocer a todos los afiliados la documentación de los distintos sistemas, propuestas de reglas, programas, batallas interesantes, etcétera. Uno de los voluntarios sería elegido director; los restantes podrían colaborar en funciones previsibles, como boletín de información, correo, comisión de reglas y otras, de acuerdo con su respectivo interés. En un futuro artículo daré el nombre y dirección del director de la red.

Continúan llegando a raudales informes de lectores que han jugado con la ecología del planeta Aqua-Tor ("Juegos de ordenador", febrero de 1985), por lo que resultará imposible comentar sino unas cuantas de las muchas interesantes experiencias descritas. A grandes rasgos, puede decirse que, eligiendo convenientemente los parámetros, se produjeron fluctuaciones robustas de las poblaciones de peces y tiburones. Algunos lectores, ansiosos de que Aqua-Tor se pareciera más a la Tierra, añadieron características especiales a sus programas. El juego invita a la complicación, y ésta se acepta. La principal desventaja de introducir sistemas variantes es, no obstante, que (a igualdad de las restantes circunstancias) las comparaciones con el sistema convencional resultan peligrosas.

Una de las cuestiones que preocuparon a los lectores fue la de medir la duración de la supervivencia de las poblaciones. Es obvio que no hay problema si éstas sobreviven eternamente, pero convendría disponer de una medida para situaciones que no lleguen a tanto. La medición en cronones, como hace notar Fredric Stevens, puede resultar equívoca cuando se eligen para los tiburones intervalos de vida y crianza muy amplios. La medición por ciclos también plantea problemas: ¿qué es un ciclo? Stevens hace la divertida observación de que si el sistema de peces y tiburones que uno ha puesto sobrevive durante un número suficiente de ciclos básicos del generador de números aleatorios, acabará por repetirse alguna de las configuraciones anteriores con un mismo estado del generador de azar, y a partir de ese momento la inmortalidad está garantizada.

Otro grupo de lectores expuso modernas teorías, útiles para el análisis de Aqua-Tor. Todavía no he oído decir la última palabra acerca de si las matrices estocásticas nos permitirán deducir las probabilidades específicas de supervi-

vencia a partir de comunicaciones dadas de los parámetros. No obstante, sí es interesante señalar que las ecuaciones de Lotka-Volterra (formuladas en 1931) han sido ulteriormente elaboradas para dar entrada en ellas a la difusión como factor que afecta tanto al depredador como a la presa. La difusión hace que las soluciones de las ecuaciones de Lotka-Volterra, de formas suaves y onduladas, adopten figuras más complicadas. Una nota histórica enviada por John S. Lew, del centro de investigación Thomas J. Watson, de IBM, reveló que Alfred J. Lotka fue un matemático estadounidense que un decenio antes que Volterra había formulado unas ecuaciones muy parecidas a las de éste.

Stephen Boyd se valió de un diagrama de fases para analizar la dinámica de la población de tiburones y peces. En cada instante t, representemos gráficamente un punto cuyas coordenadas sean los valores actuales x, de peces, e y, de tiburones. Conforme va transcurriendo el tiempo y las poblaciones van describiendo su ciclo, el punto va trazando una órbita errática en torno a un ojo, o centro, fijo. Boyd se valió de esta técnica para estudiar el efecto que sobre la supervivencia pudieran tener las dimensiones del océano. Escribe, "en los mundos más rectangulares, las órbitas perdieron sus ojos, las trayectorias se tornaron más erráticas y acabaron convirtiéndose en paseos aleatorios". Los océanos cuadrados son, evidentemente, preferibles.

Entre las innovaciones introducidas por los lectores se encontraba una fuerza vital para los tiburones, mutaciones, poblaciones con dos especies de peces, y peces que se alimentaban de plancton. En mi artículo de febrero olvidé mencionar que los peces de Aqua-Tor se nutren de un plancton oceánico omnipresente y abundante. Jim Lemon dio carácter explícito a este rasgo, situando plancton en todo lugar no ocupado por un pez o un tiburón. El plancton cría en cualquier lugar vacío, y su relación con los peces es la misma que la de éstos con los tiburones. También en este caso existen poblaciones eternas.

Los tiburones de Edgar F. Couda ganan o pierden puntos de fuerza vital, dependiendo de lo bien que coman. De este modo alcanzan a sobrevivir mucho más tiempo que los tiburones de la versión estándar de Aqua-Tor. Couda envió también representaciones gráficas (al igual que muchos de los otros programadores de Aqua-Tor) que mostraban notable coincidencia con los datos de la de Hudson Bay Company.

J. Connett supone que hay peces de dos especies. Una es la variedad ordinaria de Aqua-Tor; la otra cría siempre en cualquier punto situado al este o al sur que esté desocupado. A causa de su móvil tendencia, muchas veces la segunda especie es más longeva que la primera. Rudy Iwasko, de Sacramento, California, propuso que peces y tiburones fuesen provistos de cualidades de tamaño, velocidad y agilidad. Estos rasgos habrían de estar bajo control genético. Otro lector, Stephen R. Berggren, creó su propio sistema, que llamó EVOLVE (*evolucionar*), hace dos años. Aunque parecido a Aqua-Tor, difiere en que los animales evolucionan allí respondiendo a la presión ambiental. Así, razonaba Berggren, las poblaciones llegarían a un equilibrio que favoreciera la supervivencia a largo plazo.

Nadie tuvo éxito en resolver el problema de la persecución toroidal. Sólo revelaré ahora la mitad de la solución, para no vedar a los lectores el placer de descubrir la otra mitad. Recordemos que en cada turno ha de moverse el pez, y después, se mueven los dos tiburones. Lo mismo que en Aqua-Tor, no es lícito permanecer inmóvil. Imaginemos que del solitario pez emanan cuatro rayos; cada rayo parte en diagonal y se arrolla en torno al toro, para acabar, antes o después, cerrándose consigo mismo. En cuanto ambos tiburones ocupen un par de rayos opuestos, no importará ya cómo se mueva el pez; un tiburón lo perseguirá a distancia constante, y el otro se le viene encima. El pez está sentenciado. Dejo al cuidado de los lectores descubrir cómo logran los tiburones "cazar" los rayos.

El 21 de diciembre de 1984, George Uhing, de Bronx, Nueva York, descubrió un nuevo candidato a castor afanoso pentaestado. La máquina de Turing de Uhing comienza con una cinta en blanco y graba 1915 unos antes de detenerse. El resultado lo confirmaron independientemente Allen H. Brady, de la Universidad de Nevada, y Raphael M. Robinson, de la Universidad de California en Berkeley. La máquina de Uhing, que Brady describe como "pasmosa", parece justificar el escepticismo que ambos matemáticos habían expresado al respecto de que la máquina de Uwe Schult (de la que se dio cuenta en "Juegos de ordenador" de octubre de 1984) fuese el castor afanoso de cinco estados. Produjo solamente 501 unos.

Taller y laboratorio

Una fórmula práctica y rápida para calcular la velocidad y la eficacia del vuelo de las aves

Jearl Walker

Son numerosas las especies de aves dotadas para el planeo (vuelo sin batir de las alas), describiendo círculos en el aire ascendente. Un observador atento a sus movimientos aprendería no pocas cosas acerca de la aerodinámica del vuelo y otras tantas acerca del modo en que las distintas especies ejecutan sus evoluciones. Paul MacCready, de AeroVironment Incorporated, Monrovia, California, ha perfeccionado una técnica mediante la cual un aficionado puede calcular el coeficiente de sustentación de un ave, cantidad que mide el rendimiento del vuelo, su velocidad y el radio del circunvuelo.

Se conoce a MacCready por su fabricación de un avión de propulsión humana. En sus primeras observaciones en torno a las aves planeadoras se inspiró para construir el *Gossamer Condor*, ganador en 1977 del concurso Kremer por haber sido el primer avión de propulsión muscular capaz de dibujar un ocho. (El aparato se exhibe actualmente en el Museo Nacional norteamericano de la Aeronáutica y del Espacio.) Aquel vuelo se realizó gracias a sus cálculos acerca del planeo de las aves, concretamente de la potencia útil necesaria.

MacCready inició sus observaciones y cálculos en torno al planeo en 1976 contemplando a los buitres aura (*Cathartes aura*) en su suave planeo circular. Sus hijos le ayudaron a medir cuánto tiempo invertía un ave en describir un círculo y, además, el ángulo de escora del animal (aquel que forma con la horizontal el plano de las alas). Sujetando un transportador con el brazo extendido, medía el ángulo mientras el ave se acercaba y mientras se alejaba. Luego anotaba la media de ambas cantidades y la duración del circunvuelo.

Observó asimismo el planeo de los buitres negros (*Coragyps atratus*) y el de la mejor planeadora de todas: la fragata (*Fregata magnificens*), de la que tornó a ocuparse durante sus vacaciones en La Paz, México, en 1980. En 1982 grabó en videocinta los vuelos; valióse de una cámara de televisión provista de zoom. Al repasar la grabación midió la escora en la pantalla del monitor. Un reloj integrado en el reproductor de cinta registraba los tiempos.

Para sorpresa suya, los resultados de 1980 no coincidían con los de 1982. En 1980 la escora media resultó de 23 grados y la duración media del circunvuelo completo de 9,1 segundos. En 1982, esas cantidades resultaron ser 39 grados y 9,4 segundos, respectivamente.

Advirtió MacCready que, en el segundo grupo de observaciones, los vuelos eran mucho más altos. Estos, en razón de la perspectiva, obligaban a que las medidas fueran menos precisas. Para corregir las deficiencias, redujo los datos de 1982 a 36 grados. El misterio persistía. ¿Por qué escoraban más las aves al volar más alto? Volveremos sobre la cuestión en cuanto expongamos los cálculos de MacCready en torno a la eficacia del vuelo.

En su planeo, un ave desciende lentamente con respecto al aire que surca. Si éste se eleva más deprisa de lo que desciende el ave, el animal ganará altura sobre el suelo. La que vuela en círculo acostumbra a maniobrar para mantenerse dentro del aire ascendente. Sobre cada ala actúa la fuerza ascensional, o sustentación, que es una fuerza que ejerce el aire perpendicularmente a la recta que une las puntas de las alas. Esa fuerza es también perpendicular a la trayectoria de vuelo. Si ésta es horizontal y estable, la sustentación se hace totalmente vertical y contrarresta el peso del ave. Al escorar ésta, la sustentación se inclina respecto a la vertical un ángulo igual al de escora y adquiere una componente horizontal. Entonces, para contrarrestar el peso queda sólo la componente vertical. Si esta componente es demasiado pequeña, el animal se hundirá con relación al aire ascendente; si es demasiado grande, se elevará.

La componente horizontal de la sustentación proporciona una fuerza centrípeta para mantener el movimiento circular. La magnitud de esta componente depende de la fuerza de sustentación y del ángulo de escora.

MacCready ha deducido una fórmula matemática que permite calcular la velocidad del ave conocidos el ángulo de escora y la duración del circunvuelo. Dicha fórmula se apoya en tres hechos: (1) En un ave que planee en círculo, la componente vertical de la sustentación es igual al peso. (2) La componente horizontal de la sustentación genera un movimiento circular y, por ello, es igual a la masa del animal por su aceleración centrípeta, la cual se calcula dividiendo el cuadrado de la velocidad por el radio del círculo. (3) La velocidad de un objeto en movimiento circular es igual al perímetro del círculo dividido por el tiempo invertido en completar una vuelta.

Basándose en estos tres hechos, MacCready halló que la velocidad del ave es proporcional al tiempo de circunvuelo multiplicado por la tangente del ángulo de escora. Conocida la velociad, el radio se calcula mediante la relación entre la velocidad y el perímetro.

En la figura 3 se expone la formulación completa y en la 4 se ilustran las relaciones. Esta gráfica es un ábaco que puede usarse en el campo. Para ello se empieza midiendo el ángulo de escora de un ave que planee en círculo y el tiempo que dura una revolución. Este tiempo se busca en las abscisas del ábaco y, desde ese punto, nos desplazamos verticalmente hasta cortar la recta rotulada con el ángulo de escora medido. (Puede que tengamos que interpolar entre dos rectas si el ángulo no está reseñado.) Luego, desde esa intersección, nos vamos directamente a las ordenadas, en cuyo eje leeremos la velocidad. Un ave que complete un círculo en nueve segundos bajo un ángulo de 20 grados lleva una velocidad de unos 5,1 metros por segundo.

El ábaco facilita también el radio del círculo. Así, cuando nos hayamos desplazado en vertical desde el punto representante de la duración del circunvuelo hasta el corte con la recta de escora, el radio lo determinaremos con la curva más próxima que represente radios. En nuestro ejemplo, el radio es de 7,3 metros aproximadamente.

Sobre la base de sus observaciones de campo de 1980, MacCready ha calculado que aquellas aves planeaban a una velocidad media de 5,9 metros por segundo circunvolando con un radio medio de 8,5 metros. Mientras que en 1982 planeaban a 10,4 metros por segundo, circunvolando con un radio de 15,3 metros.

Otro parámetro es el coeficiente de sustentación, que se define en función de la carga ascensional. Esta es la sustentación dividida por el área total de la superficie superior de las alas. Entonces, el coeficiente de sustentación es el cociente de la carga ascensional entre la sobrepresión generada delante del pájaro a causa del movimiento hacia adelante. Dicha sobrepresión es igual a un medio de la densidad del aire multiplicada por el cuadrado de la velocidad del ave.

El valor real del coeficiente de sustentación depende del ángulo de ataque del ave, o ángulo bajo el que sus alas se cruzan con el aire que hienden. El mayor valor útil del coeficiente se obtiene para el ángulo que produce la entrada en pérdida, situación en la cual el flujo del aire por la parte superior del ala se separa de ésta, y no se desplaza suavemente hasta el borde posterior. A MacCready le interesan los valores que pueden alcanzar estos coeficientes en las aves planeadoras. ¿Son mayores que los que pueden conseguirse en los artefactos voladores del hombre?

Así las cosas, la definición del coeficiente de sustentación no sirve a los observadores del planeo de las aves, puesto que la sustentación es siempre desconocida. Por ello, MacCready ha replanteado la definición en función de unas cantidades que un aficionado pueda obtener. Así, sustituye la sustentación por el peso del animal. (El cociente de éste entre la superficie superior de las alas se llama carga alar.) La velocidad real la sustituye por la que llevaría el animal si volase en línea recta con el mismo coeficiente de sustentación. Esta velocidad en línea recta es la velocidad real multiplicada por la raíz cuadrada del coseno del ángulo de escora. El cociente de la velocidad en línea recta entre la velocidad real puede representarse en una gráfica [*véase la figura número 5*]. Su valor es del orden de la unidad para pequeñas escoras, pero puede ser apreciablemente inferior para ángulos mayores.

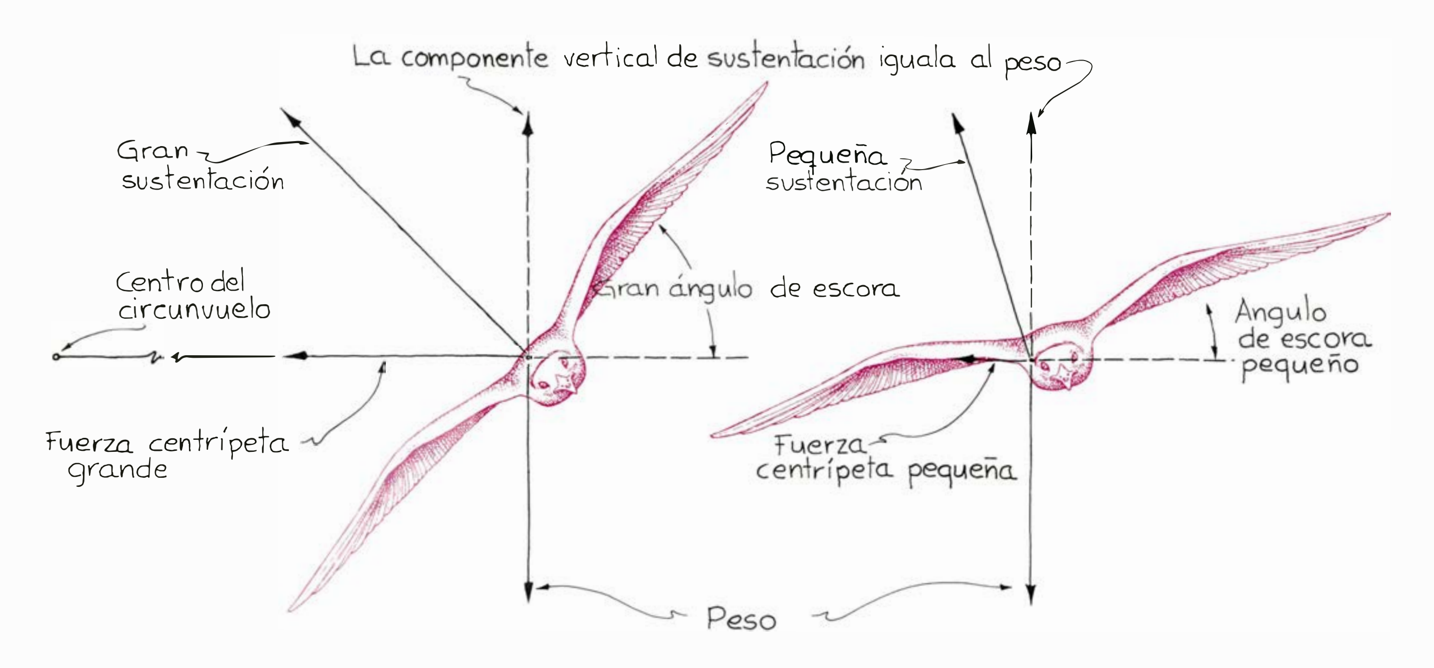
Para completar el cálculo del coeficiente de sustentación se necesita el cociente del peso entre la superficie de las alas (la carga alar) correspondiente al tipo de ave observada. Para las fragatas que observó MacCready, ese cociente es, aproximadamente, de 35,1 newton por metro cuadrado. (El newton es la unidad de fuerza adoptada internacionalmente. Un cuerpo de un kilogramo de masa sometido a la acción de un newton se aceleraría a razón de un metro por segundo cada segundo.) La densidad del aire, que hace también falta para los cálculos, depende de la presión y la temperatura. Admitiendo que las aves cuyo planeo observó estuvieran aproximadamente a nivel del mar y a una temperatura de 15 grados centígrados, MacCready tomó una densidad del aire de 1,225 kilogramos por metro cúbico.

Con estos valores, calculó un coeficiente de sustentación de 1,79 para los datos de 1980 y de 0,65 para los de 1982. Ambos resultados difieren porque las velocidades en línea recta (que dependen de la velocidad real y del ángulo de escora) son distintas.

El enigma en torno a los ángulos de escora distintos en los dos grupos de observaciones realizadas en México



1. Buitre aura remontando una térmica



2. Componentes de la sustentación

reaparece en el cálculo de los coeficientes. MacCready, cuando en 1976 efectuó sus primeras observaciones de aves planeadoras, esperaba encontrar que todos los pájaros planeasen con el mismo coeficiente de sustentación. Sus cálculos de aquel año para el buitre aura, el buitre negro y la fragata cumplieron con sus previsiones. Pero en las observaciones de 1980 y 1982 se encontró con la sorpresa de que el mismo tipo de ave no planea siempre con el mismo coeficiente de sustentación. Dado que en 1980 los vientos fueron encalmados y suaves y en 1982 turbulentos y fuertes, sacó la conclusión de que las aves ajustaban sus coeficientes de sustentación en correspondencia con las condiciones meteorológicas.

Del mismo modo, el piloto de un velero vuela más deprisa cuando describe círculos en el seno de una térmica turbulenta (una masa de aire cálido ascendente) que cuando lo hace en una encalmada. El aumento de velocidad hace que el aparato sea menos susceptible de entrar en pérdida si, por un instante, la turbulencia incrementase el ángulo de ataque del ala. Asimismo acrecienta el control del piloto. Este, además de volar más rápido, escora el planeador más en una térmica fuerte.

Estos ajustes los hacen las aves planeadoras con mayor efectividad porque su experiencia es mayor y poseen unos sensores térmicos mejores y más medios para ajustar las alas. Las videocintas tomadas por MacCready en 1982 revelan que, en la turbulencia, los pájaros alteraban de continuo el ángulo de escora y la forma de las alas, en especial el alabeo.

En algunos planeadores la carga alar es del mismo orden que la de algunas aves, tal como el buitre negro. Por ello, los pilotos de esos artefactos podrían aprovechar térmicas casi tan pequeñas como las que aprovechan las aves para volar. Pero, con todo, éstas controlan más el borde. En cierta ocasión, un experto en biología de las aves, Colin J. Pennycuick, de la Universidad de Bristol, comentó: "Me figuro que, aun cuando pudiera imitarse del todo el sistema de mandos de un ave, la carlinga estaría tan repleta de palancas que haría falta un pulpo para manejarlo". Más aún, como las alas de las aves son más cortas y proporcionalmente acortan menos el radio de giro, evitan así parte del alabeo necesario para mantener la sustentación al mismo valor sobre ambas alas. Tal ajuste es difícil en unas alas más largas, como las de los planeadores en picado.

Los veleros soportan cargas alares mayores que los planeadores y las aves y vuelan mucho más rápido. Son asimismo muy eficientes y se hunden en el aire más lentamente. Pese a ello, no pueden utilizar térmicas tan pequeñas como las aves.

Por soportar el buitre aura una carga alar sustancialmente inferior a la del buitre negro, planea en térmicas más pequeñas y débiles. Puede, además, planear a primeras horas del día (que es cuando las térmicas son más débiles). Con sus alas largas y esbeltas, la fragata es el mejor de todos los planeadores oceánicos. Aprovecha incluso las suaves células convectivas que se desarrollan en la brisa cuando el agua está más caliente que el aire.

Con viento sosegado el coeficiente de sustentación de las fragatas es de 1,8, valor sorprendentemente alto dadas las condiciones aerodinámicas del planeo de las aves. Nos dice ese dato que las fragatas pueden planear a unas velocidades tan bajas que harían entrar en pérdida a otras aves y a los planeadores. MacCready sugiere que ulteriores observaciones podrían aportar un coeficiente incluso menor para estas aves. De no ser así, habrá que concluir que las fragatas están técnicamente mejor diseñadas que los aeromodelos de tamaño parejo que vuelan a velocidades parecidas y que los expertos en aerodinámica están ante algo de lo que ocuparse.

El mes pasado les describí cómo generar una postimagen peculiar en una habitación a oscuras mientras se contempla una escena momentáneamente iluminada con un destello luminoso intenso. A causa del deslumbramiento se ven escasos detalles de la escena, pero si se mantiene la vista fija cuando vuelve a hacerse la oscuridad, aparece enseguida una postimagen detallada semejante a una instantánea de la escena. Esa postimagen puede ser tan vívida que se reconozcan las palabras impresas y otros detalles.

Parte del artículo estaba basado en las investigaciones de Edward H. Adelson, del Centro de Investigaciones

David Sarnoff de RCA. Este ofrece otra demostración de postimagen. Un sujeto completamente adaptado a la oscuridad ve una tarjeta blanca iluminada por un destello. En la postimagen percibe las letras RODS en la tarjeta aunque no hubo señal de ellas en el destello.

Para organizar esta demostración Adelson empieza por escribir en la tarjeta blanca las letras RODS con gruesos caracteres de imprenta, valiéndose de un rotulador amarillo brillante. Luego recorta en un filtro rojo una ranura de unos seis o siete milímetros de ancho, cubre ésta con un filtro azul y sujeta el conjunto al flash. Este, al destellar, emite luz roja salvo por la ranura, por donde sale luz azul. Cuando se dispara el flash, tras haber adaptado la vista a la oscuridad, se verá únicamente una tarjeta en blanco bañada de luz roja. A las dos o tres décimas de segundo aparecerán las letras RODS.

Adelson explica la percepción de las letras en función de la luz absorbida por la tinta amarilla. Bajo la luz roja, la tarjeta se ve en blanco porque la tinta no absorbe luz alguna. Bajo la luz azul, la tarjeta exhibe las letras en gris oscuro porque la tinta absorbe el azul. Los conos de la retina resultan dominados por la luz roja intensa, que enmascara el gris de las letras formado bajo la luz azul pálido. Los bastoncitos, insensibles al rojo, registran la presencia de las letras, pero la luz azul los satura inicialmente y así no se perciben las letras. Cuando se liberan de dicha saturación acaban por permitir la percepción.

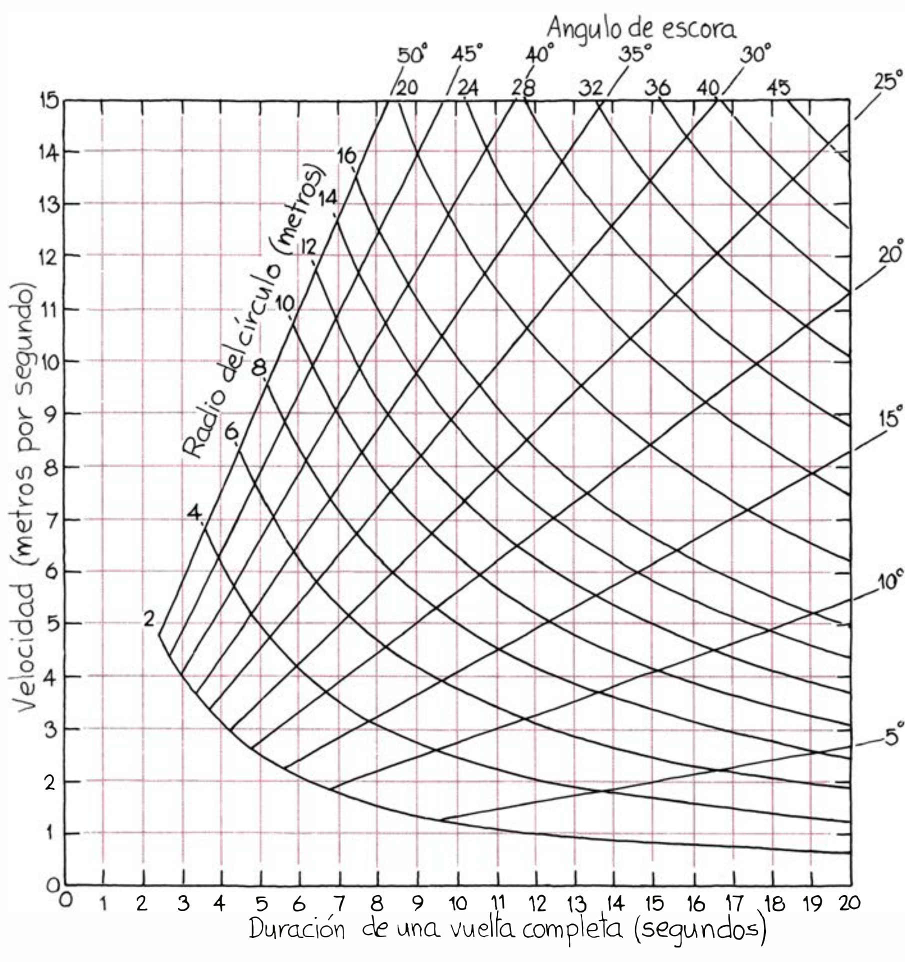
La cantidad de azul del flash hay que ajustarla; si es excesiva, se contemplarán las letras durante el destello y no habrá sorpresa al verlas en la postimagen; si escasa, no se verán tampoco.

La tarjeta puede prepararse de modo que las letras se perciban una tras otra. Para ello se sostiene el flash a unos quince centímetros de la *S* y se ladea hasta que queden iluminadas todas las letras. De éstas, la última en ser iluminada es la *R*. Entonces, los bastoncitos que reciban la imagen de la *R* estarán menos saturados, por cuya razón esa letra se percibirá antes que las demás. La siguiente en percibirse será la *O*, cuando se desaturen los bastoncitos correspondientes. La última en percibirse será la *S*, pues los bastoncitos que recibieron su imagen fueron los más iluminados y, por tanto, son los que más tardan en liberarse de la saturación.

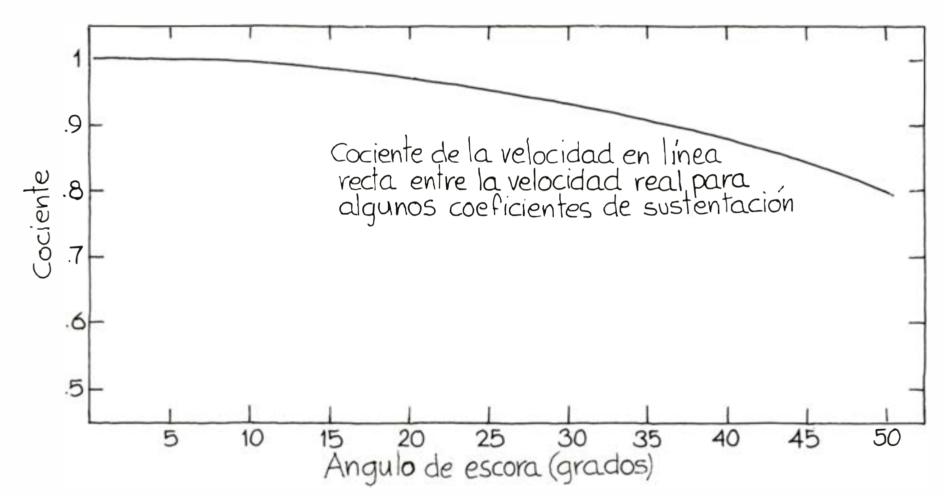
Howard Brody, de la Universidad de Pennsylvania, y Joseph P. Straley, de la de Kentucky, me corrigen un

t — Duración de una vuelta	Igualación de fuerzas verticales: $L\cos\theta = mg$
L — Sustentación	
g — Aceleración de la gravedad	La componente horizontal de la sustentación produce una fuerza centrípeta $L\sin\theta = \frac{mv^2}{r}$
W y mg — Peso del ave	
v — velocidad	Relación entre velocidad y radio: $v = \frac{2\pi r}{t}$
v_a — Velocidad en línea recta asociada	
θ — Angulo de escora	Expresiones resultantes entre la velocidad y el radio: $v = \frac{tg\tan\theta}{2\pi}$, $r = \frac{vt}{2\pi}$
r — Radio del círculo	
S — Area de la cara superior del ala	Velocidad en línea recta asociada: $v_a = v\sqrt{\cos\theta}$
L/S — Carga ascensional	
W/S — Carga alar	Coeficiente de sustentación $C_L = \frac{L/S}{dv^2/2} = \frac{W/S}{dv_a^2/2}$
d — Densidad del aire	

3. Fórmulas de Paul MacCready



4. Abaco para determinar la velocidad y el radio de circunvuelo de un ave planeadora



5. Procedimiento para determinar la velocidad en línea recta de un ave

fallo que se me deslizó en el artículo correspondiente al mes de noviembre, dedicado a los juegos de pelota. Escribí que en el bote elástico en el suelo la componente vertical de la velocidad se invierte, conservando el valor. Así, los rebotes subsiguientes deben ser de la misma altura.

Pese a lo clara que tal conclusión debía ser para mí, me olvidé de ella al contemplar cómo una pelota de gran elasticidad cruzaba rebotando el suelo de mi cocina. Al dar efecto a la pelota, me pareció que se movía dando botes alternativamente altos y bajos. Pero aquello era ilusión: la altura de cada bote era en realidad casi la misma. Lo que ocurría es que, a causa del efecto, la pelota salía despedida del suelo bajo ángulos diferentes. Así, cuando la componente horizontal de la velocidad tras un bote era baja, la pelota se elevaba bajo un ángulo inclinado, pero cuando la componente horizontal era alta, el ángulo se tornaba obtuso. Esta diferencia entre ángulos la interpreté erróneamente entonces como debida a una diferencia en alturas.

Me indica asimismo Brody que, en el tenis, el papel del efecto es más complicado que en el frotón. "El rebote alto de un tiro con sobregiro y el bajo de uno con contragiro no resultan de la interacción entre la pelota y la superficie de la cancha, sino del hecho de que el primero aumenta la componente vertical de la velocidad y el segundo la disminuye", me escribe. "Esta diferencia se debe al efecto Magnus." (La expresión se refiere a las diferentes presiones del aire a uno y otro lado de la pelota, consecuencia de la interacción de la superficie giratoria con el aire que surca. Según el efecto, esa diferencia de presiones puede elevar la pelota o impulsarla hacia abajo.) En el frontón, este efecto es menor porque la pelota es más lisa.

Joseph W. Kennedy me ha escrito acerca de algunos enigmas no resueltos asociados a los tiros de frontón. Situado hacia la mitad derecha de la cancha lanza ùn disparo. La pelota incide en la pared frontal, en la parte posterior de la pared izquierda y en la mitad izquierda de la trasera, para caer al suelo frente a la mitad derecha de la misma. Un contrincante experto puede anticiparse a esta posición final y devolver el tiro.

Kennedy, tras alguna tiradas de ese tipo, introduce un leve cambio, guiando el golpe con la muñeca. (Maneja la derecha.) Entonces, aunque la pelota parece dar en las paredes en los mismos puntos que antes, llega al suelo en una posición mucho más cercana a la pared trasera. Es probable que, así, el contrincante se encuentre demasiado lejos de ésta para alcanzar a devolver el tiro en buenas condiciones. Kennedy opina que quizá comunique un efecto a la pelota con el movimiento de muñeca.

En otro tiro peculiar (y un tanto extraño), la pelota choca de frente, a gran velocidad, con una esquina delantera. Cae entonces al suelo y no hay quien la devuelva. Sin duda, ello se debe al frotamiento de la pelota con dos paredes a la vez, pero ignoro si alguien ha desentrañado los detalles de la colisión.

Un "tiro mortal" es el dirigido horizontalmente y a gran velocidad hacia algunos centímetros por encima de la base de la pared frontal. El rebote es muy pegado al suelo y cuesta devolverlo. Pero, a veces, cuando la pelota golpea la pared a seis o siete centímetros del suelo, en el rebote se eleva hasta diez o doce centímetros de altura y se devuelve con más facilidad. ¿Por qué se eleva entonces? Acaso suba más por lo que aduce Brody.

Libros

Teoría limnológica, Pierre Duhem, manual de microscopía y dinámica geofísica de fluidos

M.ª Rosa Miracle, Mariano Artigas, J. J. Vázquez y Agustín Udías

LIMNOLOGÍA, por Ramón Margalef. Editorial Omega; Barcelona, 1984. Las aportaciones del profesor Margalef han contribuido de manera notable al desarrollo de la limnología, tanto desde un punto de vista naturalista como teórico. En sus trabajos se ligan las observaciones sobre la ecología de los organismos a la formulación de consideraciones o leyes generales. Su vida científica ha coincidido con el desarrollo de la ecología y la limnología como ciencias modernas, lo que, según sus mismas palabras, le ha permitido construir sus hipótesis e ideas sobre problemas reales. Sin embargo, también la ecología se ha visto favorecida, puesto que Margalef es parte de su desarrollo, capítulo importante de la historia de esta ciencia. Estamos ante uno de esos casos en que no sabemos qué destacar: un ambiente propicio para el desarrollo de unas aportaciones científicas o estas aportaciones que son las que propician el ambiente facilitando ulteriores contribuciones. Así lo demuestran sus numerosos trabajos constantemente citados, tanto en artículos especializados como en textos y obras de tipo general.

Estamos, pues, ante un texto de limnología creado al calor de la observación directa, cuya lectura se torna progresivamente más sugerente y apasionante a medida que se avanza por sus páginas. Según es característico de los escritos del autor, encierra una visión profunda de las cosas, una visión sintética u holística que trasciende a todos los campos de la ciencia. Trasciende la simple descripción de unos hechos o exposición de unas ideas, hasta perfilar y reconstruir la teoría general.

Margalef es autor también de un texto de ecología, de estructura y características muy similares. Asiduo colaborador de *Investigación y Ciencia*, ha escrito, además, dos libros de teoría de la ciencia ecológica, en el último de los cuales, *La biosfera: entre la termodinámica y el juego*, sintetiza una gran parte de su pensamiento sobre los ecosistemas. El libro que reseñamos tiene carácter de compendio; en él se hallará lo sobresaliente de los principales temas, fruto de los años de trabajo del autor y de la recopilación de una extensísima bibliografía, que ha sido rigurosamente seleccionada como la más interesante, puesto que se trata de un libro general y de generalizaciones. Cada uno de los veinte capítulos presenta al final una relación de 100 a 400 citas bibliográficas.

La mayoría de las gráficas son originales, pensadas con el acierto de quien ha llegado a comprender los fenómenos naturales. Muchas contienen datos de nuestro país, procedentes de investigaciones realizadas por él mismo o por colaboradores directos del departamento de ecología de la Universidad de Barcelona. Conocedor de la mayoría de las aguas continentales españolas, las presenta, en numerosas ocasiones, como modelos o ejemplos de su razonamiento.

La obra se articula en tres partes: seis capítulos para establecer las bases de la limnología, seguidos de siete más para presentar la ecología de los organismos que forman parte de los ecosistemas acuáticos continentales y siete capítulos finales para el estudio de esos ecosistemas. Cada parte constituye, pues, una unidad en sí misma, e integran tres tipos de enfoque diferentes de la limnología, pudiendo utilizarse independientemente en cursos más breves. Ninguna revisión general resumida puede comentar de una manera representativa este compendio, por ello muestrearé aquí y allá para ofrecer algunos datos al lector.

El enfoque naturalista del libro, el afán de compendiar la mayor parte de la información existente sobre un tema y la visión de la misma por encima de la propia disciplina vienen preconizados por la inclusión del árbol filogenético de G. E. Hutchinson en el capítulo primero, dedicado a la historia de la limnología. A este reconocido investigador de la Universidad de Yale, autor de textos con tendencias similares y que ha estimulado a toda una generación de ecólogos, se le ha denominado en algunas ocasiones padre de la limnología.

En el segundo capítulo presenta el origen y evolución de las aguas continentales. Para examinar el proceso de diferenciación entre éstas y las aguas marinas, aconseja: "hay que tomar en consideración el contenido total de agua en la superficie del planeta, su distribución en una serie de compartimentos y las características del flujo entre unos y otros". Con ello introduce los modelos de compartimentos y de manera sencilla y didáctica resume la distribución del agua en la Tierra. Además de tratar los diferentes tipos de lagos según su origen, considera, en extensión, las aguas corrientes, apenas abordadas en los libros de limnología no obstante su enorme interés: los cauces de aguas fluyentes, tal como se lee en el texto, han sido más persistentes que la mayoría de los lagos. La acertada idea de describirlas como ejemplo de un proceso de autoorganización les da aún más relevancia. En las otras dos partes del libro volverán a estudiarse según los puntos de vista indicados correspondientes a cada una de las partes.

El tercer capítulo, sobre la química de las aguas, se enfoca desde el punto de vista de las interrelaciones entre los diferentes parámetros; facilita una comprensión rápida de la razón de las proporciones de los diversos elementos que, aunque crecientes con la mineralización, están determinados por una serie de regularidades debidas a equilibrios químicos e interacciones biológicas. Más tarde, en el capítulo catorce, se exponen los ciclos biogeoquímicos, dentro del marco del funcionamiento del ecosistema. La física de las aguas (capítulo 4) también es completa en todos los sentidos, con apartados interesantes como los que ponen de manifiesto la importancia de la turbulencia de las aguas y las heterogeneidades horizontales creadas por fenómenos físicos, sin dejar de lado la estratificación vertical de las aguas y la circulación y movimientos de las mismas.

Dedica un buen número de páginas a la biogeografía de las poblaciones de las aguas de la Península Ibérica, de gran valor, con un ejemplo bien escogido y muy elaborado sobre los anfípodos, que ilustra las vicisitudes por las que ha atravesado la península y los tipos de distribución actuales. Algunos quedan como memoria de los factores geográficos y ecológicos del pasado, sobre las que se superponen los avatares de una dispersión reciente. Además no descuida la consideración de endemismos, sobre los que tiende a ser exhaustivo, por los menos en cuanto a moluscos, crustáceos, insectos y grupos

superiores, incorporando descubrimientos recientes, siendo el más espectacular el de *Baleaphryne muletensis*, del que se incluye una fotografía. Esta especie es similar al sapo partero y pertenece a un género endémico de las Baleares, del que sólo se había encontrado restos fósiles, hallándose por primera vez adultos vivos en la isla de Mallorca en 1980.

Acaba esta primera parte con un capítulo sumario de la ciencia ecológica, que inserta la limnología en la ecología. Los capítulos 13-17 compendia cuanto se conoce sobre la ecología de los organismos acuáticos, en donde va presentando, grupo por grupo, las diferentes morfologías, adaptaciones y consideraciones evolutivas y autoecológicas de los distintos taxones, desde las bacterias hasta los peces. Esta presentación incluye informaciones del máximo interés. Por ejemplo, las referentes a la reproducción de los ostrácodos, cuyos espermatozoides son "realizaciones únicas en el reino animal, células supranormales" de longitud hasta ocho veces mayor que la de su propio cuerpo.

Los distintos taxones se estudian distribuidos en capítulos, según las comunidades de que forman parte: fito- y zooplancton, fito- y zoobentos, peces y descomponedores. Después de la presentación de los taxones integrantes de cada una de estas comunidades, examina la función de las mismas en el ecosistema y construye una ecología para cada una de ellas. Así, analiza sus interrelaciones con los factores fisicoquímicos, su estructura y distribución, ordenación y tipología, etcétera. El capítulo sobre ecología de la comunidad fitoplanctónica, objeto principal de las investigaciones del autor, constituye una síntesis muy completa, con acertados modelos originales sugerentes y esquemas abstractos ilustrativos, como la "mendala" de la sucesión fitoplanctónica. Afirma su tesis que la turbulencia del agua es "comparable a la deriva genética y ambas difuminan los límites en distribuciones en el espacio"; junto con los nutrientes, resulta uno de los factores principales que determinan los tipos biológicos de las algas y su sucesión, cuyo motivo principal es el paso de un agua turbulenta y rica en nutrientes a un agua estratificada y pobre.

Como colofón a esta parte volvemos a encontrar un capítulo de integración muy atractivo, donde, aparte de presentar los ciclos biogeoquímicos, resume su pensamiento sobre el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos. De nuevo se ofrecen modelos originales de gran valor heurístico.

La última parte describe los tipos de ecosistemas acuáticos, su comportamiento y características esenciales, sintetizando una importante cantidad de datos sobre los organismos que los pueblan. Especialmente completos son los capítulos de ríos y embalses, raramente desarrollados, como ya se ha dicho, en los libros de limnología, con sistematizaciones de datos de la Península Ibérica. Resume además un estudio simultáneo muy completo y elaborado de más de un centenar de embalses españoles. En un país pobre en lagos, dice, la construcción de embalses ha constituido un experimento ecológico valioso, y lo propone para establecer las bases de una limnología regional.

En un capítulo sobre ecosistemas forzados trata de la eutrofización y contaminación de las aguas. Define los sistemas forzados o en tensión como los que están sometidos a fuerzas poco habituales y reaccionan minimizando las consecuencias de tal tensión. Así puede caracterizar el proceso de eutrofización por el conjunto de mecanismos mediante los que el ecosistema desvía parte de los nutrientes y de la producción fuera del sistema, principalmente a la atmósfera y al sedimento.

Otros ambientes, como las aguas saladas, ácidas, termales o subterráneas, son tratados también en otro capítulo como ecosistemas de condiciones extremas.

Con el capítulo dedicado a los sedimentos se cierra el libro; los sedimentos son la memoria de los sistemas acuáticos y recopilan su historia. En la penúltima página del texto se encuentra un dibujo, modificado, de un frontispicio de una paleontología del siglo XVIII, en el que un investigador encuentra una serie de fórmulas en el sedimento (fósiles en el dibujo original): a partir de la gran cantidad de información contenida en la naturaleza, pondera Margalef, el investigador revela aquello por lo que está interesado o le preocupa. En muchos casos las interpretaciones son válidas, pero representan tan sólo una ínfima parte de lo que eventualmente se podría conocer.

La limnología ha adquirido un notable relieve en los últimos años; el agua, tan necesaria para el hombre y sus industrias, se ha visto afectada recientemente por la contaminación a gran escala, hasta convertirse en el problema medio-ambiental más importante de los últimos años. Las aguas naturales son, además, el mejor indicador del estado de salud de los ecosistemas terrestres. El propio autor comenta en el prólogo que una de las motivaciones al escribir el libro ha sido el deseo de dar a conocer la naturaleza, de manera que se incremente el respeto hacia ella y se pueda acertar más a la hora de tomar una decisión.

Desde el punto de vista de un limnólogo, el enfoque naturalista, junto con el carácter marcadamente sintético, lo hacen único con respecto a los otros textos de limnología existentes. Además, para el especialista y para el biólogo en general es, a la vez, libro de consulta y fuente de inspiración de sus investigaciones futuras. Sólo nos queda aguardar del autor el regalo de un texto de oceanografía. (M. R. M.)

UNEASY GENIUS: THE LIFE AND WORK OF PIERRE DUHEM, por Stanley L. Jaki. Martinus Nijhoff Publishers; The Hague-Boston-Lancaster, 1984. Las referencias a Pierre Duhem (1861-1916) son numerosas en los estudios de epistemología y, obligadas, en los de historia de la ciencia. Sin embargo, suelen ser un tanto parciales. Le tildan superficialmente de convencionalista y, de positivista, quienes sostienen que las teorías científicas son puros instrumentos conceptuales desprovistos de contenido real. Además, los escasos estudios monográficos que existían hasta ahora no arrojaban mucha más luz sobre sus ideas.

Duhem fue ante todo un físico eminente, profesor en Lille y en Burdeos, que no recaló en París por motivos extra-académicos, aunque sus méritos fueron ampliamente reconocidos. La lista abreviada de sus publicaciones desde 1884 ocupa 18 páginas del libro de Jaki. Su extensa obra escrita culmina, en la física, con el *Traité d'Energétique* de 1911, donde intentó presentar la física clásica en una sistematización rigurosa a la luz de sus propias ideas. En la epistemología, *La théorie physique* de 1906 plantea y orienta grandes temas de la moderna filosofía de la ciencia. Como historiador, además de su importante historia de la mecánica, sus estudios sobre Leonardo de Vinci y su conocido trabajo sobre el concepto de teoría física de Platón a Galileo, destacan los 10 volúmenes de *Le système du monde*, impresionante trabajo publicado entre 1913-1917 (los 5 primeros tomos) y 1954-1959 (los otros 5, a título póstumo).

La epistemología de Duhem se centra expresa y rigurosamente en el análisis lógico de las teorías de la física matemática. Parte del sentido común, admitiendo un realismo filosófico que no estudia sistemáticamente; especifica las leyes científicas como aproximaciones

simbólicas y siempre mejorables para dar cuenta de los fenómenos; y concibe la teoría como un sistema construido para dar razón de las leyes del mejor modo posible, sin pretensiones metafísicas que son propias de la filosofía. Sin negar la posible utilidad parcial de los modelos mecánicos, Duhem se opone al mecanicismo como tesis científico-filosófica; aunque esto pudo influir en que quedara un tanto al margen de la física atómica naciente en su época, fue y continúa siendo la perspectiva más adecuada para interpretar las teorías físicas, y todavía más si se considera las que surgieron posteriormente: el enfoque de Duhem, en líneas generales, resulta una valiosa ayuda para adentrarse en las discusiones sobre la mecánica cuántica.

Entre las contribuciones de Duhem a la epistemología moderna es obligado señalar su tesis acerca de la imposibilidad de efectuar un experimento crucial que decida con pleno rigor entre teorías alternativas. El propio falsacionismo popperiano, que más tarde alcanzaría amplio predicamento, se encuentra desarrollado en la obra de Duhem.

En física, fue un maestro sobresaliente e indiscutible, aunque algunas de sus investigaciones más características no llegaran a conclusiones duraderas en todos los casos. E importa destacar que los amplios trabajos epistemológicos e históricos de Duhem siempre tuvieron como objetivo principal contribuir al progreso de la física.

Pero es la historia de la ciencia el ámbito donde el genio de Duhem ha dejado una señal más honda. Un amplio trabajo desarrollado perseverantemente durante años le permitió abrir nuevos horizontes, a veces muy diferentes de los clisés tradicionalmente admitidos. Especialmente interesante es su tesis, documentada con enorme erudición y detalle, acerca del progreso de la ciencia en la Edad Media. Es posible que se excediera en la ponderación de sus héroes medievales (Buridam, Oresme, la escuela de París), pero de él arranca la tesis, hoy plenamente aceptada y sólidamente corroborada, según la cual la ciencia moderna no apareció repentinamente desde las tinieblas, sino que fue la culminación de un largo proceso en el que muchos medievales fueron depositando importantes contribuciones. Como dato significativo, Duhem propuso como fecha fundacional de la ciencia moderna el 7 de marzo de 1277, y dedicó en buena parte el sexto volumen de *Le système du monde* a fundamentar esa afirmación.

Las circunstancias personales de Pierre Duhem llevan a una explicación de sus logros y limitaciones. Era una persona de firmes convicciones, íntegro hasta el sacrificio de éxitos sociales, con gran capacidad de trabajo y católico convencido. Todo ello tuvo su parte en la profundidad de sus estudios, en su prestigio intelectual y ético y, al mismo tiempo, en cierta falta de flexibilidad para adoptar planteamientos científicos diferentes de los propios y en los obstáculos que encontró por motivos ideológicos.

Sus tesis epistemológicas e históricas pueden parecer adaptadas a una defensa intelectual del cristianismo en la que, sin duda, se sentía comprometido. De hecho, ya en vida tuvo que defenderse frente a críticas de este tipo, y lo hizo brillantemente. El examen desapasionado de su obra revela una ardua e incansable búsqueda de la verdad muy ajena a compromisos partidistas.

Stanley Jaki ha conseguido una obra importante, a la medida de los méritos de Duhem. En parte, porque sus campos de interés son muy semejantes. Jaki realizó su tesis doctoral en física bajo la dirección de Victor F. Hess, descubridor de los rayos cósmicos y premio Nobel. Antes de ceder a la tentación de la pluma se dedicó durante cuatro años a la historia y la filosofía de la ciencia en Stanford, Berkeley y Princeton. Sus tesis epistemológicas e históricas prolongan las de Duhem, aunque se extienden a ámbitos mucho más amplios y variados. Jaki, hoy profesor en Seton Hall, ha dedicado varios años a la obra sobre Duhem, trabajando en Francia sobre todo el material existente –publicaciones, personas, archivos–. Su simpatía por el biografiado no le impide señalar netamente las limitaciones de su obra, cuya influencia estudia y valora de modo exhaustivo.

El libro de Jaki consta de 10 capítulos. Los 7 primeros están dedicados a la biografía de Duhem, que va hilvanando cronológicamente. Nos reproduce las vicisitudes de la ciencia en las últimas décadas del siglo pasado y en las primeras del actual, junto con los eventos políticos e ideológicos que influyeron en ellas. Los tres últimos capítulos están dedicados a los tres campos de trabajo de Duhem. El octavo trata sobre su física, el noveno sobre su filosofía de la ciencia y el décimo sobre su historia de la ciencia. Cada uno de ellos expone la labor de Duhem, la influencia que ejerció en su tiempo y la valoración que le mereció a muy distintos autores.

El interesado en estos temas encontrará abundante material en otras obras de Jaki, en las que los temas duhemianos y la obra misma de Duhem se examinan con detalle: *The Relevance of Physics* (University of Chicago Press, 1970); *The Road of Science and the Ways to God* (University of Chicago Press, 1978), que compila las "Gifford Lectures" de Jaki en Edimburgo en 1974-75 y 1975-76; *Science and Creation* (Scottish Academic Press, 1974); *The Origin of Science and the Science of Its Origin* (Scottish Academic Press, 1978), que aborda expresamente la historiografía de Duhem y recoge las "Fremantle Lectures" que dio en Oxford en 1977.

La actualidad de estos temas es patente. Alberto Elena, doctor en filosofía y profesor de historia de la ciencia en la Universidad Autónoma de Madrid, ha publicado recientemente una obra en la que somete las tesis de Duhem a una severa crítica (*Las quimeras de los cielos. Aspectos epistemológicos de la revolución copernicana*. Siglo veintiuno; Madrid 1985). En esta obra no se cita a Jaki. Y se cae en el tópico. Se presenta a Duhem como "furibundo convencionalista" (p. 2), y se le achaca que sus tesis históricas están viciadas por su intento de hacer una apología del cristianismo (p. 7-10).

Pero el *instrumentalismo* que Elena atribuye a Duhem no responde a la realidad. Las breves citas de Duhem al respecto (p. 4) están sacadas de un contexto profundo y matizado al que Elena ni siquiera alude. En efecto, la lectura completa de la obra mencionada, *La théorie physique*, muestra a las claras que Duhem sostiene la existencia de un orden natural que, captado en un primer paso por las leyes experimentales científicas de modo aproximado y perfectible, es alcanzado progresivamente por las teorías de la física matemática que representan esas leyes. Difícilmente se puede calificar esta postura como convencionalista o instrumentalista. Lo que Duhem defiende ante todo es la autonomía de la física en su propio ámbito, mostrando que su método no le permite obtener enunciados científicos a partir de teorías metafísicas concretas.

Duhem tiene ante sí, sobre todo, las interpretaciones mecanicistas, muy extendidas en su época, y que son el blanco principal de sus críticas (aunque admite su utilidad parcial). Pero su idea básica no sólo es aceptable, sino que cobra mayor valor cuando se aplica al posterior desarrollo de la física y a las interminables discusiones a que ha dado lugar. Duhem es un físico profesional, y sus tesis difícilmente se entenderán si esto se olvida o no se sabe físi-

ca. Y, desde luego, aunque los físicos tienen en último término una clara intención realista, es un hecho que la física matemática se cultiva desde hace tiempo en una dirección fuertemente influida por enfoques pragmatistas y convencionales, y que estos mismos enfoques condicionan la mayor parte de la actual filosofía de la ciencia. La obra de Duhem, con sus lógicas limitaciones, proporciona indicaciones de gran valor para delimitar el alcance de la física y sus relaciones con el conocimiento en general. Y la obra de Jaki amplía esas indicaciones y las aplica a la física actual. Incidentalmente, se puede señalar que las objeciones principales de Elena se encuentran solucionadas no sólo en la obra de Jaki que hemos comentado sino también en sus anteriores escritos, e incluso que se solucionan con un estudio más atento de la obra de Duhem. (M. A.)

Manual de Microscopía, por Marcel Locquin y Maurice Langeron. Editorial Labor, S.A.; Barcelona, 1985. Nos hallamos ante un nuevo manual de microscopía que reúne de manera manejable una información muy útil sobre tres áreas diferentes de la microscopía: el microscopio, la metodología más habitual hoy en día y la técnica histológica. Estos tres aspectos, que podrían ocupar otros tantos volúmenes, han sido adecuadamente compendiados en este libro, de reducido tamaño, con un formato que permite un fácil manejo. Es evidente que no se puede reunir en obra de estas dimensiones toda la información existente en los tres campos, que "in extenso" ocupa hoy amplias monografías y a la que están dedicadas algunas revistas periódicas. Por ello, los autores han tenido que realizar una ardua labor de síntesis, para no dejar de tratar aspectos esenciales del microscopio y de la metodología, así como una meticulosa crítica de las técnicas, ciñéndose a las más eficaces, que son descritas con el detalle y precisión suficientes como para ser fácilmente reproducibles por cualquier persona iniciada en la microtecnia.

Como autores figuran Marcel Locquin y Maurice Langeron. No obstante, como se señala en el prólogo, Maurice Langeron, autor de la obra *Précis de Microscopie*, de la que había proyectado redactar una nueva edición, renovada, en colaboración con Locquin, murió antes de ver realizada la idea, por lo que su ejecución recayó propiamente sobre Locquin, persona con una amplia experiencia en microscopía, que en él se había convertido en pasión. Marcel Locquin es un verdadero artesano del laboratorio que, para asegurarse de la calidad de las técnicas descritas, procuró realizarlas personalmente o asistió a su aplicación en laboratorios especializados, lo que le permitió un conocimiento directo de cada una y la elección de la más útil en caso de técnicas similares. Por otra parte, no era la primera vez que él mismo se embarcaba en la dura tarea de escribir un libro sobre microscopía. Ya en 1957 y en colaboración con Albert Policard y Marcel Bessis había publicado *Traité de Microscopie*, editado igualmente por Masson. Por esto, la obra presente aúna, en cierta medida, una doble herencia y nace de la madurez que sólo una amplia experiencia puede dar.

La traducción al español ha sido una magnífica labor de Mercedes Durfort, buena conocedora del área, por lo que, más que una versión de una lengua a otra, puede considerarse como la puesta en nuestro idioma de las ideas contenidas en la edición francesa, realizando siempre una redacción española auténtica.

Como decía antes, la obra está estructurada en tres grandes apartados. El primero trata de los instrumentos y de las técnicas instrumentales. Aborda el microscopio de luz y el electrónico, poniendo el acento en el fotónico, en el empleo del microscopio y en la observación microscópica. Junto a ideas muy generales, por razones de extensión, se encuentran detalles prácticos de gran utilidad, como pueden ser la limpieza de la lente frontal del objetivo, cuya mala práctica ha estropeado buen número de éstos, y los errores que pueden llevar a la incapacidad de formar la imagen a fuertes aumentos. En la parte de técnicas instrumentales se pasa repaso a casi la totalidad de los métodos de estudio hoy existentes: observación en campo oscuro, con luz refleja, luz ultravioleta, en contraste de fases, etcétera. También trata de la toma de imágenes, dibujos, reconstrucciones, métodos de medición, espectrografía y microanálisis.

En el segundo gran apartado expone los métodos de fijación, observación, corte y montaje. Tanto en este apartado como en el siguiente es donde quizá más se nota el gran conocimiento práctico que poseen los autores, a juzgar por el elevado número de soluciones prácticas para el buen hacer en el laboratorio histológico. También se aprecia su dedicación preferente a la histología vegetal, lo que explica algunas ausencias, como la del criostato, mientras se dedica buen espacio al corte a mano alzada, al microtomo de mano, etcétera.

El tercer apartado trata exhaustivamente de los colorantes, en donde el consultor puede encontrar la fórmula química desarrollada, y de las tinciones e impregnaciones.

Al final aparece una útil bibliografía, distribuida por años de más reciente a más antigua, en la que se carga la tinta en las obras editadas por Masson.

La diversidad de temas tratados: microscopía, técnicas de microtomía y tinción en histología animal y vegetal, protozoología, micología, etcétera, hacen de este manual un libro muy útil no sólo en el laboratorio de histología e histopatología, sino también en botánica, zoología, fisiología vegetal y microbiología. Por su estructura es un libro de consulta más que un libro para seguir recetas concretas. Gran parte de los problemas técnicos que a uno se le presentan en el laboratorio pueden ser resueltos consultando este cómodo manual. (J. J. V.)

Geophysical Fluid Dynamics, por J. Pedlosky. Springer Verlag; New York, 1982. Los problemas geofísicos que se relacionan con el movimiento de fluidos en la Tierra no se limitan a la oceanografía física y meteorología dinámica, sino que tienen también que ver con el movimiento del material del interior terrestre. Aunque con velocidades muy lentas sabemos que tanto el material del núcleo externo como el del manto y los bloques de la litosfera están sujetos también a movimientos. En todos los casos, la influencia del giro de la Tierra y la heterogeneidad del medio dan origen a problemas especiales, cuya solución exige un tratamiento especial, en el que es frecuente utilizar modelos cada vez más complejos de aproximaciones sucesivas al problema real. Esto hace que los problemas geofísicos de la dinámica de los fluidos constituyan un capítulo específico de la teoría general de la mecánica de fluidos. J. Pedlosky, profesor del departamento de ciencias geofísicas de la Universidad de Chicago, ha recogido en este libro su experiencia docente sobre este tema.

Trata, con una creciente complejidad, los problemas que se presentan en el movimiento de fluidos en una Tierra en rotación. Los dos primeros capítulos, titulados cuestiones preliminares y fundamentales, resumen los principios básicos del movimiento de un fluido en un sistema de referencias en giro. Se examinan las fuerzas inerciales centrífuga y de Coriolis, destacando la importancia del número de Rossby y de

Ekman, que indican para qué escala de movimientos y naturaleza de un fluido importa el influjo de la rotación. Sigue la definición de la vorticidad y circulación y su relación con la rotación planetaria, el movimiento geostrófico y el sentido que tiene la aproximación geostrófica. El capítulo siguiente trata de la dinámica de una capa sujeta a rotación de un fluido homogéneo incompresible y de viscosidad nula. Aunque no aplicable directamente a los problemas geofísicos, esta simplificación constituye una primera aproximación y para muchos de ellos nos permite una serie de intuiciones aplicables a la situación real. El autor hace ver cómo a pesar de su simplicidad, este modelo puede aplicarse a muchos fenómenos de movimientos de la atmósfera y los océanos. En ellos, la aproximación geostrófica se toma como un primer escalón, a partir del que se procede a consideraciones más complejas. La primera parte del capítulo 3 trata de la aproximación lineal aplicable al movimiento de una capa de agua superficial. En ella se trata del movimiento estacionario cuasigeostrófico. La definición de las ondas de Rossby, producidas por la rotación y el gradiente del fondo, lleva a su estudio.

La introducción de la viscosidad del fluido y el efecto de la fricción conducen a la consideración de la capa de Ekman y a desarrollar la dinámica cuasigeostrófica en presencia de fuerzas de fricción en el capítulo 4. En el capítulo siguiente se aplican estas consideraciones al problema de la circulación oceánica de corrientes arrastradas por el viento para un modelo homogéneo. A pesar de su sencillez, este modelo pone de manifiesto las condiciones de contorno del problema físico y las ideas esenciales de dinámica de la circulación oceánica general. Varios modelos de circulación se proponen dentro del caso homogéneo, desde las aproximaciones lineales hasta las más complejas. El modelo homogéneo, presentado con suficiente detalle, permite una intuición profunda en muchas de las propiedades de la circulación oceánica, sin tener que introducir las hipótesis necesarias para resolver el problema completo.

En el capítulo 6 se introduce la estructura de la variación vertical de la densidad del fluido. Esta consideración es necesaria para su aplicación, tanto a la atmósfera como a los océanos, en los que existe una estratificación de densidades. La solución del problema completo del movimiento de un fluido estratificado, compresible y en rotación, no es fácil; el autor progresa, siguiendo la metodología presente en toda la obra, utilizando aproximaciones sucesivas y diversos parámetros de escala, tanto en la estratificación como en las dimensiones del modelo. Los conceptos básicos establecidos en el modelo homogéneo, como el movimiento geostrófico y las ondas de Rossby, se extienden en este capítulo al caso de un fluido estratificado. Los resultados teóricos son aplicados al caso de una atmósfera y océanos estratificados.

El capítulo dedicado a la teoría de inestabilidades da las líneas generales para el tratamiento de este tipo de problemas. La existencia de fluctuaciones en la circulación de la atmósfera y los océanos se puede atribuir, en efecto, a procesos inestables a partir de un estado dinámico tomado como estable. Sin embargo, se hace ver cómo la definición del estado estable lleva consigo también sus dificultades, ya que el estado inicial no siempre coincide con el estado obtenido tomando una medida temporal que elimina las fluctuaciones. El problema se establece a partir de las condiciones de inestabilidad para modelos estratificados con estabilidades lineales. Esto lleva a tratar el problema de inestabilidad baroclínica y barotrópica para flujo zonal y no-zonal y, por último, la teoría no lineal de inestabilidad baroclínica. El último capítulo se ocupa del problema del movimiento cuando éste es fuertemente anisótropo. Esta situación lleva al llamado movimiento ageostrófico. Ejemplos de este tipo de movimiento son las ondas en plataformas continentales, en las que la topografía varía rápidamente, la formación de frentes en la atmósfera y la dinámica en la zona ecuatorial.

En esta obra se presentan los más importantes problemas de la dinámica de los fluidos sobre la superficie de la Tierra, sujetos al efecto de la rotación y al calentamiento por parte del Sol, y la influencia de la falta de homogeneidad, tanto de los fluidos como de sus condiciones de contorno. Los problemas tratados son de complejidad creciente. Los desarrollos teóricos se encuentran aplicados a problemas de la atmósfera y los océanos. Este libro constituye un texto excelente para cursos de mecánica de fluidos y sus aplicaciones geofísica, en especial de oceanografía física y meteorología dinámica. La claridad en la presentación y el empleo de modelos sencillos para explicar diversos aspectos de las situaciones encontradas en la naturaleza lo hacen especialmente adecuado para la docencia. (A. U.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

CUMPLIMIENTO DE LOS ACUERDOS SOBRE CONTROL DE ARMAMENTO

THE KEYHOLE SATELLITE PROGRAM. Jeffrey Richelson en *The Journal of Strategic Studies*, vol. 7, n.º 2, págs. 121-153; junio, 1984.

ARMS CONTROL VERIFICATION. Dirigido por Kosta Tsipis y Penny Janeway. Pergamon-Brassey's International Defense Publishers. En prensa.

VOLCANES Y NUBES DE VENUS

LA SUPERFICIE DE VENUS. Gordon H. Pettengill, Donald B. Campbell y Harold Masursky en *Investigación y Ciencia*, n.º 49, págs. 22-34; octubre, 1980.

VENUS. Dirigido por D. Hunten, L. Colin, T. Donahue y V. Moroz. University of Arizona Press, 1983.

PLANETS AND THEIR ATMOSPHERES: ORIGIN AND EVOLUTION. J. Lewis y R. Prinn. Academic Press, 1984.

TRANSLOCACIONES CROMOSOMICAS Y CANCER HUMANO

HUMAN C-*MYC ONC* GENE IS LOCATED ON THE REGION OF CHROMOSOME 8 THAT IS TRANSLOCATED IN BURKITT LYMPHOMA CELLS. Riccardo Dalla-Favera, Marco Bregni, Jan Erikson, David Patterson, Robert C. Gallo y Carlo M. Croce en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 79, n.º 24, págs. 7824-7827; diciembre, 1982.

TRANSLOCATION OF THE C-*MYC* GENE INTO THE IMMUNOGLOBULIN HEAVY CHAIN LOCUS IN HUMAN BURKITT LYMPHOMA AND MURINE PLASMACYTOMA CELLS. R. Taub, I. Kirsch, C. Morton, G. Lenoir, D. Swan, S. Tronick, S. Aaronson y P. Leder en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 79, n.º 24, págs. 7837-7841; diciembre, 1982.

SPECIFIC CHROMOSOMAL TRANSLOCATIONS AND THE GENESIS OF B-CELL-DERIVED TUMORS IN MICE AND MEN. George Klein en *Cell*, vol. 32, n.º 2, págs. 311-315; febrero, 1983.

DIMENSIONES OCULTAS DEL ESPACIO-TIEMPO

SUPERGRAVEDAD Y LA UNIFICACIÓN DE LAS LEYES DE LA FÍSICA. Daniel Z. Freedman y Peter van Nieuwenhuizen en *Investigación y Ciencia*, n.º 19, págs. 78-91; abril, 1978.

SUPERGRAVITY THEORY IN 11 DIMENSIONS. E. Cremmer, B. Julia y J. Scherk en *Physics Letters*, vol. 96B, n.º 4, págs. 409-412; 19 de junio de 1978.

DYNAMICS OF DIMENSIONAL REDUCTION. Peter G. O. Freund y Mark A. Rubin en *Physics Letters*, vol. 97B, n.º 2, págs. 233-235; 1 de diciembre de 1980.

SEARCH FOR A REALISTIC KALUZA-KLEIN THEORY. Edward Witten en *Nuclear Physics B*, vol. 186, n.º 3, págs. 412-428; 10 de agosto de 1981.

POR QUE SALTAN LAS BALLENAS

ACOUSTIC COMMUNICATION AND BEHAVIOR OF THE SOUTHERN RIGHT WHALE (*EUBALAENA AUSTRALIS*). Christopher W. Clark en *Communication and Behavior of Whales*. Dirigido por Roger Payne. Westview Press, Inc., 1983.

ENERGETICS OF LEAPING IN DOLPHINS AND OTHER AQUATIC ANIMALS. R. W. Blake en *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, vol. 63, n.º 1, págs. 61-70; 1983.

STRUCTURE AND STABILITY OF HUMPBACK WHALE GROUPS OFF NEWFOUNDLAND. Hal Whitehead en *Canadian Journal of Zoology/Journal Canadien de Zoologie*, vol. 61, n.º 6, págs. 1391-1397; junio, 1983.

YACIMIENTOS AURIFEROS IBERICOS EN LA ANTIGÜEDAD

CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE LA MINERÍA PRIMITIVA DEL ORO EN EL NOROESTE DE ESPAÑA. C. Saenz Ridruejo y J. L. Velez González. Ediciones Atlas; Madrid, 1974.

MINES D'OR ROMAINES D'ESPAGNE. LE DISTRICT DE LA VALDUERNA (LEÓN). Publications de la Université de Toulouse-Le Mirail; Toulouse, 1978.

RÖMINSCHER GOLDBERGBAU IM NORDWESTEN SPANIENS. EIN FORSCHUNGSBERICHT. F.-J. Sánchez-Palencia Ramos en *Der Anschnitt* 2-3, págs. 38-61; 1979.

EL CAUREL. J. M. Luzón Nogué, F.-J. Sánchez-Palencia Ramos et al. Ed. Ministerio de Cultura; Madrid, 1980.

LAS EXPLOTACIONES AURÍFERAS Y LA OCUPACIÓN ROMANA DEL NOROESTE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA. F.-J. Sánchez-Palencia Ramos y L. C. Pérez García en *II Seminario de Arqueología del Noroeste Peninsular*. Santiago, 1980.

IMPLANTACION IONICA DE SUPERFICIES

IMPLANTACIÓN DE IONES EN METALES. Julio A. Alonso y José M. López en *Investigación y Ciencia*, n.º 77, págs. 10-19; febrero, 1983.

TAILORED SURFACE MODIFICATION BY ION IMPLANTATION AND LASER TREATMENT. S. T. Picraux y L. E. Pope en *Science*, vol. 226, n.º 4675, págs. 615-622; 9 de noviembre de 1984.

QUIMICA DEL AJO Y LA CEBOLLA

THE BOOK OF GARLIC. Lloyd J. Harris. Holt, Rinehart and Winston, 1975.

THE LACRYMATORY FACTOR OF THE ONION: AN NMR STUDY. Eric Block, Larry K. Revelle y Ali A. Bazzi en *Tetrahedron Letters*, vol. 21, n.º 14, págs. 1277-1280; 1980.

(E,Z)-AJOENE: A POTENT ANTITHROMBOTIC AGENT FROM GARLIC. Eric Block, Saleem Ahmad, Mahendra K. Jain, Roger Crecely, Rafael Apitz-Castro y María R. Cruz en *Journal of the American Chemical Society*. En prensa.

JUEGOS DE ORDENADOR

CORE WAR GUIDELINES. D. G. Jones y A. K. Dewdney. SCIENTIFIC AMERICAN, 415 Madison Avenue, New York, N.Y. 10017; marzo, 1984.

WAR GAMES, Philip Elmer-DeWitt en *Time*, vol. 124, n.º 16, págs. 109; 15 de octubre de 1984.

TALLER Y LABORATORIO

SOARING BIRD AERODYNAMICS—CLUES FOR HANG GLIDING. Paul B. MacCready, Jr., en *Ground Skimmer*, n.º 45, págs. 17-19; octubre, 1976.

SOARING AERODYNAMICS OF FRIGATE BIRDS. Paul B. MacCready, Jr., en *Soaring*, vol. 48, n.º 7, págs. 20-22; julio, 1984.